16

La vida como productora de combustible: carbón y petróleo

Desde que en este planeta se originó la vida los seres vivos han creado materia orgánica en una cantidad que es equivalente al peso de la tierra.

Philip H. Abelson, 1957.

Fuentes de combustibles naturales

Anhídrido carbónico, agua y sol son las fuentes primarias de los compuestos de carbono de todos los seres vivos y de los que vivieron en el pasado. Bajo la influencia de los rayos solares, las plantas verdes, incluyendo la mayoría de las bacterias, absorben energía radiante y la utilizan para sintetizar CO_2 y H_2O en carbohidratos tales como celulosa $(C_6H_{10}O_5)_x$, almidón $(C_6H_{10}O_5)_y$ y azúcar $(C_6H_{12}O_6)$. Como estos compuestos son equivalentes a carbono y agua, su formación implica liberación de oxígeno. Se han realizado muchas investigaciones para descubrir cómo se produce esta *fotosíntesis,* ya que muchos de los problemas urgentes de la humanidad —en especial la necesidad de recursos energéticos siempre mayores— se facilitarían si fuera posible imitar los métodos de la naturaleza económicamente. Cuando el pigmento o materia colorante de las plantas verdes (clorofila) se expone a la luz solar en agua «marcada» con trazas de H_2O^{18} (en lugar de la normal H_2O^{16}) se encuentra que la mayor parte del oxígeno liberado procede del agua y no del anhídrido carbónico, tal como se había supuesto antes. Hablando esquemáticamente, lo que ocurre es que de los compuestos que tienen agua se separa oxígeno e hidrógeno y entonces el hidrógeno se combina con anhídrido carbónico para formar los carbohidratos mencionados:

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$$
liberado

$$2H_2 + CO_2 \rightarrow (CH_2O) + H_2O$$
hidrato de carbono

Parte del oxígeno liberado se combina con carbono de materia orgánica para formar anhídrido carbónico; otra parte se consume en procesos de meteorización; y el resto pasa a la atmósfera o al mar. El ciclo de cambios se resume esquemáticamente en la figura 16.1. Si la reacción clorofílica dejara de mantener el actual suministro de oxígeno, pronto la atmósfera se volvería irrespirable.

Si todos los restos en descomposición de los organismos muertos se oxidaran completamente, no quedaría oxígeno libre. En condiciones acuáticas la oxidación no es completa. Por ejemplo, los productos de descomposición de la vegetación se acumulan en el suelo en forma de humus, y en pantanos y ciénagas en forma de turba. Los depósitos de turba enterrados de épocas antiguas se han transformado en vetas de carbón. En los sedimentos marinos se consume una gran parte del material orgánico de la vida vegetal y animal, bien como alimento o bien por oxidación, pero una parte se salva de la destrucción total y queda atrapada en depósitos fangosos formando minúsculas gotitas de aceite y burbujas de gas, que son los materiales fuente del petróleo y del gas natural concentrados en los campos petrolíferos. Así, la vida es responsable de todos los combustibles naturales, madera, turba, carbón, petróleo y gas y de la cantidad enormemente mayor de material carbonoso y bituminoso disperso en las pizarras y en otras rocas sedimentarias.

Es interesante considerar qué le ha ocurrido al oxígeno correspondiente al carbón fijado en la materia orgánica. Las cifras dan una idea de las enor-

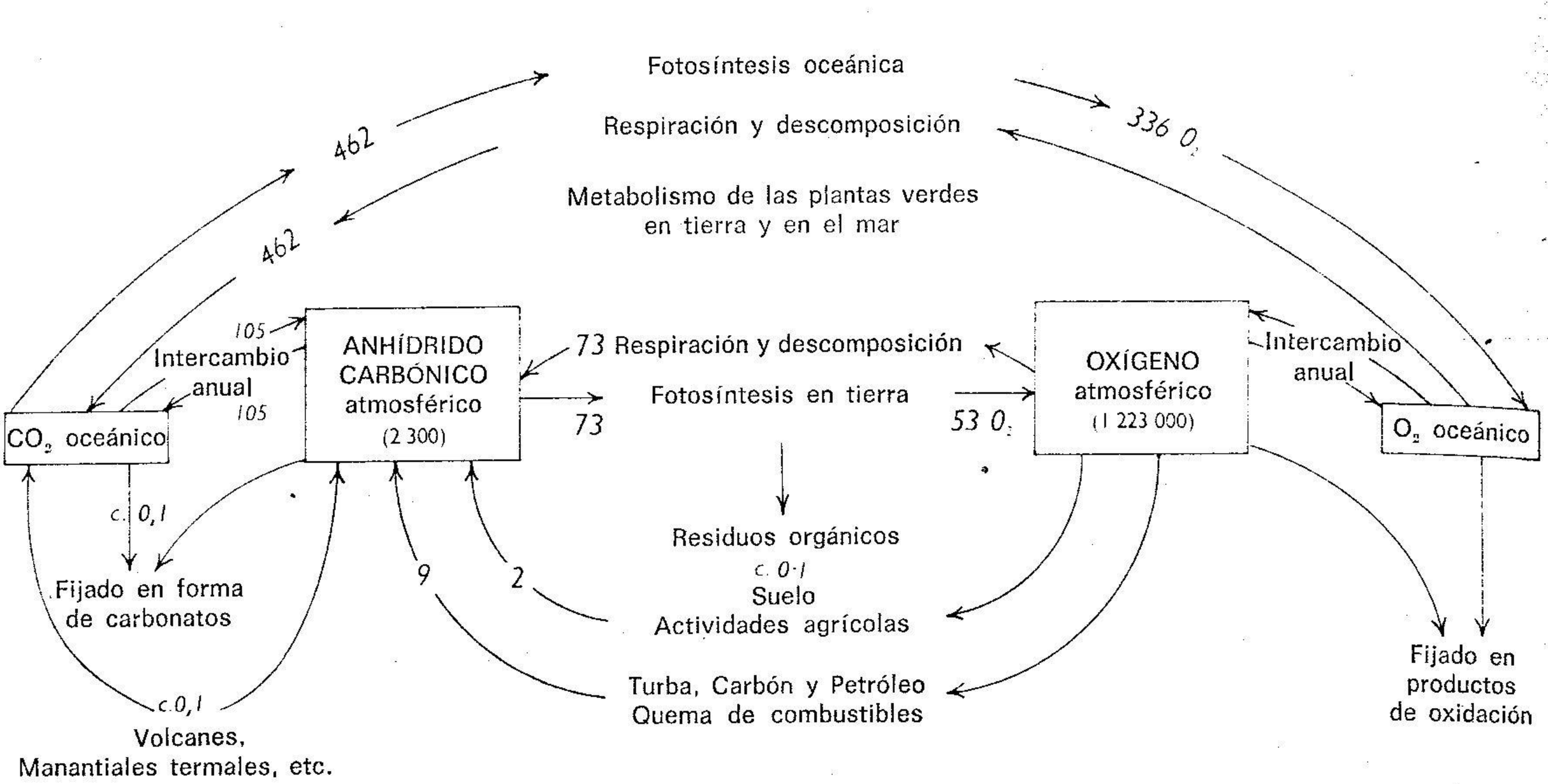


Figura 16.1. Resumen esquemático del ciclo anhídrido carbónico-oxígeno. Todas las cifras representan unidades de 109 (mil millones de) toneladas. Las cifras entre paréntesis son cantidades globales presentes actualmente en la atmósfera; las que no tienen paréntesis son cantidades anuales de CO_2, excepto en los casos especificados de O_2 producido por fotosíntesis.

mes cantidades implicadas y son un testimonio elocuente del trabajo de incontables generaciones de plantas y animales. Usando todos los datos disponibles, incluyendo trabajos recientes sobre las proporciones de isótopos de carbono en diversos compuestos de carbono, F. Wickmann calcula que, para toda la tierra, el carbono fijado en todos los sedimentos es de unas 3500×10^{12} toneladas. Éste incluye el carbono de carbón y petróleo, el cual, junto con el de la turba y el suelo, forma sólo 1/400 del total. La materia viva forma probablemente 1/4000 del total. 3500 billones de toneladas de carbono fijado implican la liberación de 9300 billones de toneladas de oxígeno (de acuerdo con las ecuaciones de la pág. 309). Tal como indica la siguiente tabla no se sabe bien dónde va parte del oxígeno:

Oxígeno	*Billones de toneladas*
En la atmósfera	1223
Disuelto en el océano y en otras aguas superficiales	12
Consumido en la oxidación del FeO a Fe_2O_3	1400
Consumido en la oxidación del S	4100
	6735
No se sabe dónde va a parar	2565
Cantidad total liberada	9300

Los cálculos de oxidación son máximos, y las pequeñas cantidades de oxígeno consumido en otros procesos de meteorización y en la formación de nitratos a partir del nitrógeno quedan totalmente cubiertas. Es posible que gran parte del oxígeno no controlado se haya usado, directa o indirectamente, en reacciones con gases volcánicos tales como hidrógeno (oxidado a H_2O) y monóxido de carbono (oxidado a CO_2).

Turba

En los ambientes de aguas estancadas, tales como charcas y ciénagas, la descomposición de restos vegetales muertos llevada a cabo por bacterias y hongos está limitada por la escasez o ausencia de oxígeno y la aparición de ácidos orgánicos antisépticos que inhiben las actividades bacterianas. Bajo estas condiciones, los residuos vegetales más blandos y finamente macerados se transforman en un humus pardo oscuro y gelatinoso. Parte de él empapa las células de fragmentos de madera, cortezas, raíces, ramas, etc., que también

se van «humificando», y por consiguiente la estructura celular de estos residuos suele conservarse perfectamente. Todos los productos humificados, junto con una proporción variable de materiales menos destructibles, como la resina y las cubiertas céreas de polen y esporas, se acumulan y forman depósitos de turba.

El proceso de humificación enriquece los residuos en carbono, tal como se indica aproximadamente en la siguiente ecuación:

$$2C_6H_{10}O_5 = C_8H_{10}O_5 + 2CO_2 + 2CH_4 + H_2O$$

celulosa — *residuo humificado* — *metano*

El metano, conocido familiarmente como gas de los pantanos, es muy inflamable, y sus llamas pálidas son responsables de los «fuegos fatuos» que ocasionalmente se ven flotar en la superficie de una ciénaga. En las minas de carbón, donde a veces el gas escapa en cantidades desastrosas desde la superficie expuesta del carbón, es el principal constituyente del grisú, que se enciende con demasiada facilidad y explota.

La vegetación que contribuye a la formación de la turba va desde los musgos (turba de charca, fig. 16.2) a los árboles (turba de bosque, figura 16.3) y el ambiente puede ser una tierra baja pantanosa o una altiplanicie encharcada de drenaje imperfecto. El clima debe ser húmedo y las condiciones deben ser tales que el crecimiento supere la destrucción. En las charcas cenagosas de regiones húmedas frías, la tasa de descomposición es baja debido a la baja temperatura, mientras que en pantanos densamente poblados de vegetación de las regiones tropicales, la gran rapidez de crecimiento supera incluso la rápida tasa de descomposición.

En el fondo de lagos y charcas circundados por vegetación pantanosa se acumula una variedad especial de turba. El polen y las hojas, arrastrados por el viento, caen al agua, a donde también van a parar toda clase de partículas orgánicas. Año tras año se van depositando en el fondo formando capas sucesivas de barro orgánico. Las algas de agua dulce pueden hacer su aportación adicional. Localmente, las esporas y restos de algas pue-

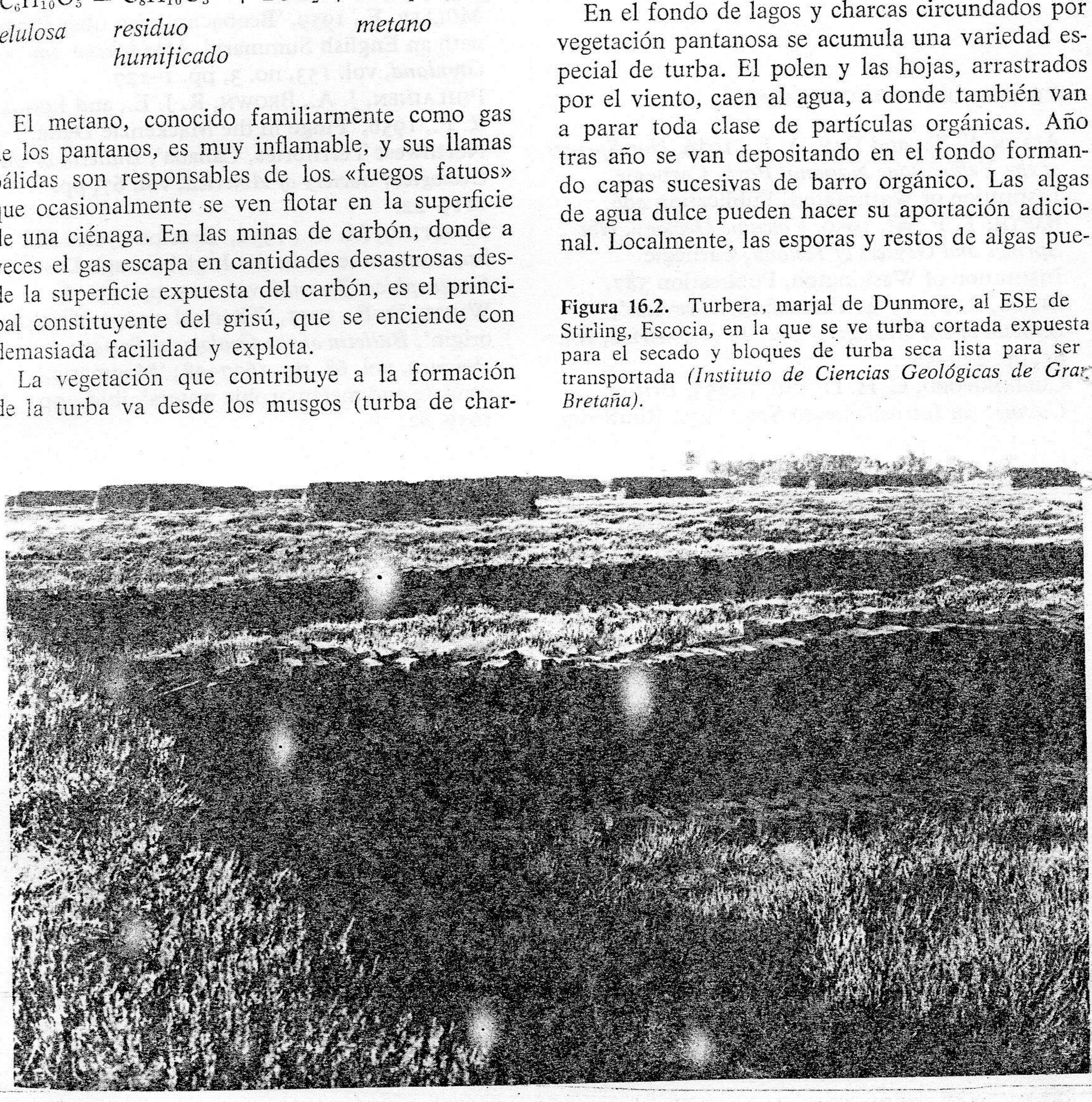
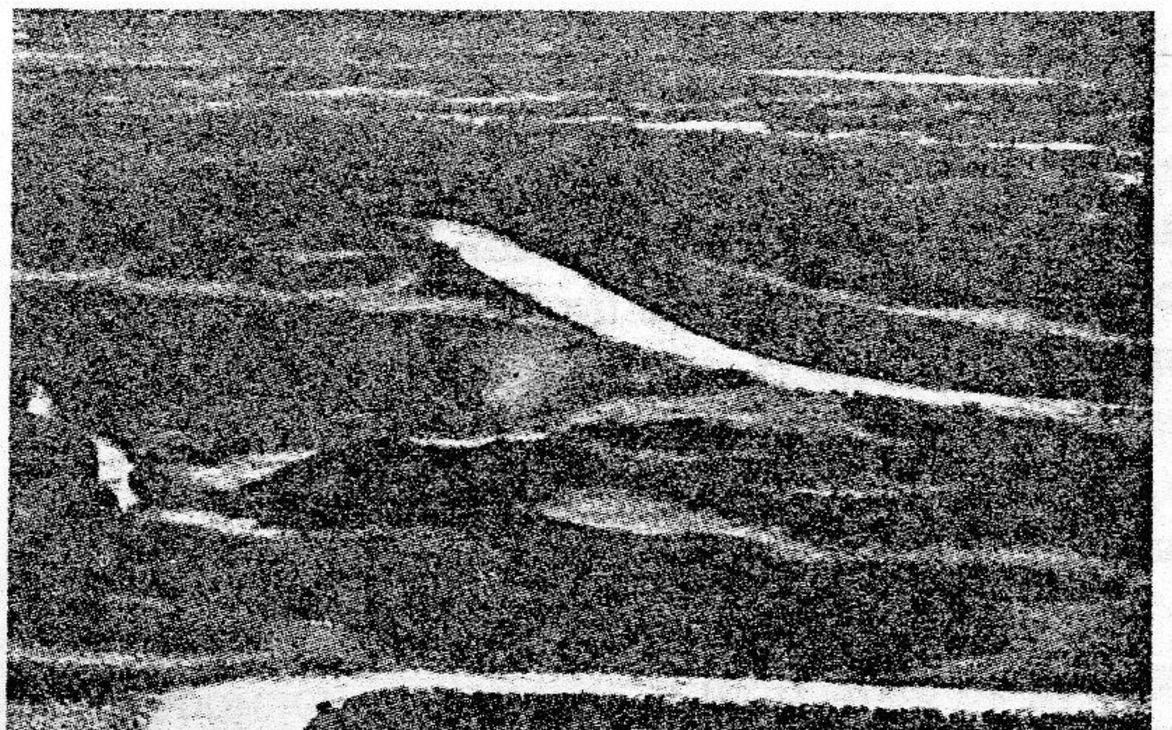


Figura 16.2. Turbera, marjal de Dunmore, al ESE de Stirling, Escocia, en la que se ve turba cortada expuesta para el secado y bloques de turba seca lista para ser transportada *(Instituto de Ciencias Geológicas de Gran Bretaña).*

Figura 16.3. Turba de bosque, con los restos de pinos al descubierto por la explotación de la turba, cerca de Daless, valle de Findhorn, región Moray Firth, Escocia *(Instituto de Ciencias Geológicas de Gran Bretaña).*

Figura 16.4. Vista aérea del bosque, pantanos y cursos de agua, delta del río Irrawaddy, Birmania *(Del Burma Forest Bulletin, n.º 11).*



den predominar, dando lugar a un depósito que es especialmente rico en los ingredientes céreos y oleosos de la vegetación. Si en el agua desembocan cursos fluviales, el barro suele contaminarse con una cierta proporción de sedimento fangoso.

Muchos miles de lagos someros que en principio ocupaban depresiones en zonas glaciares se han convertido en turberas por la permanente multiplicación de la vegetación de marjales y ciénagas, y en otros aún prosigue el proceso de relleno. Los juncos, cañas y otras plantas lacustres avanzan gradualmente sobre el cieno gelatinoso oscuro formado a partir de los residuos de generaciones anteriores. En superficie a veces crece una vegetación flotante que puede formar balsas esponjosas de gran espesor. Mientras tanto, se va acumulando fango orgánico que eleva el fondo y, finalmente, acaba convirtiendo el lago en un pantano. La traidora superficie puede cubrirse de montones de musgos del grupo de los esfagnos, como en las

turberas de Irlanda. Cuando las condiciones de drenaje son adecuadas, la sucesión vegetal puede culminar en un bosque de árboles cuyas raíces estén adaptadas a las precarias condiciones de la base de apoyo en que se desarrollan.

A mayor escala, se desarrollan marismas a partir de lagunas y lagos someros de las llanuras costeras, los lechos de inundación fluvial y los deltas. La Dismal Swamp (Ciénaga Triste) del llano costero de Virginia y Carolina del Norte es una inmensa zona forestal situada a sólo un metro sobre el nivel del mar y atravesada por brazos de mar (fig. 23.52). Aquí. más de 2400 km² están cubiertos con una capa de turba de un grosor promedio de 2 m. A lo largo de la costa nordeste de Sumatra hay muchos pantanos dispersos que soportan manglares tropicales casi impenetrables. Se sabe que en una de estas selvas se ha acumulado un espesor de turba de hasta 9 m.

Las ciénagas muy pobladas de árboles del Ganges y otros deltas tropicales (fig. 16.4) proporcionan condiciones ideales para el desarrollo de la turba, y sirven para demostrar las condiciones climáticas y geográficas en las que se formaron las vetas de carbón del período Carbonífero. Además, las perforaciones efectuadas en el delta del Ganges y en otros deltas revelan una sucesión de capas de turba enterradas con depósitos intercalados de arena y arcilla. La serie hace pensar en alternancias repetidas de sedimentación y crecimiento vegetal, con un nivel superficial siempre próximo al nivel del mar.

A medida que la turba se va acumulando, el agua atrapada se escurre de las capas inferiores, y la turba que madura se contrae y consolida. Sin embargo, todavía contiene una alta proporción de agua y, antes de que pueda ser usada como combustible, es necesario secarla al aire durante un período de tiempo largo. Entonces, su aspecto puede variar entre el de un material leñoso o fibroso pardo claro y el de una sustancia amorfa negra o pardo oscura.

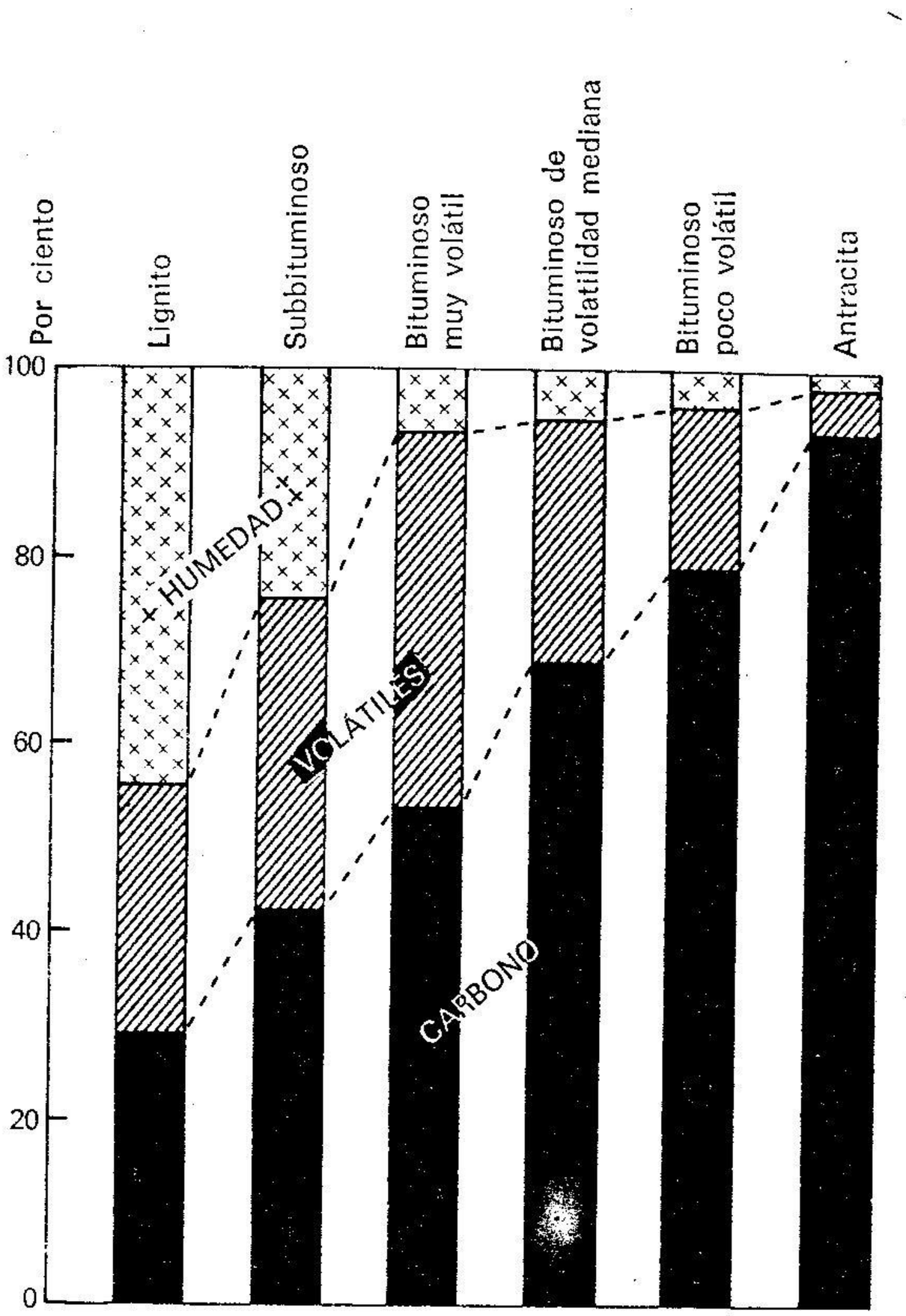


Figura 16.5. Representación de la variación de composición de carbones de distinta graduación (*Según P. Averitt,* 1974).

Carbón y sus variedades

La turba enterrada bajo una cubierta de arcillas y arenas se vuelve más compacta. A medida que la presión de la cobertera aumenta y el agua y los gases siguen escapando, su composición va variando y se enriquece progresivamente en una variedad de carbón (fig. 16.5). Se ha calculado que para que se forme 1 cm de carbón ordinario se requieren 5 cm de turba. Así, las condiciones esenciales para el desarrollo de una veta de carbón son: crecimiento continuado durante mucho tiempo de turba; subsidencia de la zona, y recubrimiento de la turba por una gruesa acumulación de sedimentos.

Hay variaciones muy grandes en las características del carbón, que dependen de los porcentajes relativos de carbono, volátiles y humedad que contenga; la antracita es una excepción, ya que es el porcentaje de carbono fijado lo que determina su graduación (fig. 16.5). El tipo de carbón depende principalmente de la profundidad a la cual quedó enterrado, del aumento de la presión ejercida por la cobertera y del ascenso de la temperatura con la profundidad, combinados para producir la expulsión de volátiles. Esta correlación

se ha establecido bien en los yacimientos carboníferos del Ruhr, Alemania occidental, donde la graduación aumenta con la profundidad. Sin embargo, hay excepciones en las que la elevada presión, al impedir que escapen los volátiles, puede impedir la evolución hacia carbones de mayor grado. Por ejemplo, se considera que el aumento de grado en las formaciones carbonosas de Durham ha dependido principalmente del aumento de temperatura (Jones y Cooper, 1972). La graduación del carbón puede estar influenciada por factores adicionales, como la duración del tiempo que estuvo enterrado, o sea, la edad del carbón, por la deformación tectónica y por el metamorfismo térmico inducido por intrusiones ígneas adyacentes más jóvenes. Estos cambios son puramente locales cuando se deben a diques o mantos interestratificados suprayacentes. Los mantos subyacentes al carbón, en especial si son de gran espesor, pueden provocar cambios regionales de la graduación del carbón. Aunque parezca raro, la naturaleza de las plantas originales y el ambiente en que se acumularon apenas influyen en el grado del carbón.

En carbones de *tipos normales* predominan los residuos de madera y corteza, que indican su procedencia de turba de bosque. El carbón de grado más bajo, o sea la variedad más parecida a la turba, se llama *lignito.* Suele conservar estructuras vegetales visibles, aunque también tiene variedades, a veces conocidas como *carbón pardo,* en el que los tejidos de la madera son oscuros. Los lignitos y los carbones pardos son comunes en los yacimientos terciarios de carbón de Europa y Norteamérica, pero no son importantes en Gran Bretaña.

Los carbones familiares lustrosos negros o de color gris oscuro de Gran Bretaña y de otros yacimientos del Carbonífero pertenecen a un grupo de combustibles de alto grado llamados colectivamente *carbones bituminosos.* Este término no implica la presencia del material llamado «betún», sino que hace referencia al hecho de que en la obtención de gas del carbón y del coque, uno de los productos de la destilación, el *alquitrán,* es bituminoso. El carbón de grado más alto —la antracita— es duro, frágil y pétreo, no mancha los dedos, quema con una llama que no desprende humo y tiene un gran poder calorífico.

Los barros orgánicos ricos en esporas o restos de algas forman carbones de *tipos especiales.* Estos contienen menos carbono que los normales de su rango correspondiente, pero son mucho más ricos en hidrógeno. Al calentarlos producen muchos hidrocarburos y si se destilan dan petróleo. Las variedades en las que predominan los restos de algas se llaman *carbones «boghead»,* o «*boghead*s», nombre que toman de la localidad situada al oeste de Edimburgo de donde se extrajeron de las minas por vez primera. Son compactos y correosos y a menudo parecen cuero pardo oscuro o negro. Dejan mucho residuo de cenizas, la mayor parte del cual es el material fangoso que contaminó el barro original. Si aumenta la proporción de sedimento inorgánico el boghead pasa a ser *pizarras bituminosas.*

Entre el carbón bituminoso y el boghead hay variedades intermedias llamadas *carbón «cannel».* En algunas de ellas abundan las esporas y bolas de resina, mientras que otras contienen, además, restos de algas. El carbón «cannel» es negro mate, y a simple vista aparece sin estructuras. Se presenta en vetas individualizadas o en lentejones y bandas dentro de las vetas de carbón ordinario. El nombre hace referencia al hecho de que las astillas de cannel arden como una bujía, hecho que a su vez demuestra su riqueza en hidrocarburos inflamables.

Constitución del carbón

En casi todos los bloques de carbón bituminoso se puede observar una estructura estratificada o bandeada bien marcada (fig. 16.6). Las bandas más comunes están compuestas de carbón blando y lustroso que se rompe fácilmente en trozos rectangulares de superficies lisas y brillantes. Muchas de las bandas parecen no tener estructura y como el material se parece bastante a un vidrio negro se ha llamado *vitrita.* Otras bandas están finamente laminadas y formadas de fragmentos y películas de vitrita contenidas en una matriz de grano muy fino. Este tipo de material carbonoso se conoce como *clarita.* Estas bandas brillantes están separadas por capas de un tipo de carbón-negro mate que, como es relativamente duro y correoso, se llama *durita.* Ninguno de estos tres tipos mancha los dedos. El «tizne» que produce el carbón se debe a la presencia, en general en pequeñas can-

Figura 16.6. Superficie pulimentada de un bloque de carbón (aumento aproximado 2,5), veta de carbón Herrin n.º 6, Gallatin County, Illinois, C = clarita; D = durita; F = fusita; V = vitrita *(Servicio Geológico del Estado de Illinois).*

tidades, de un cuarto tipo de material llamado *fusita.* Consiste en delgadas escamas o lentejones de «carboncillo mineral» muy friable, que se presenta a intervalos en la veta. El carbón se astilla naturalmente con mucha facilidad a lo largo de estos planos de debilidad, y como la fusita se reduce muy pronto a polvo, el carbón roto también tizna.

Todos los tipos de carbón son muy opacos y para que la luz pueda atravesar el material y se pueda examinar al microscopio hay que hacer secciones diez veces más delgadas que las de las rocas ordinarias. Una película translúcida de vitrita de 0,0025 mm de espesor ya no es negra,

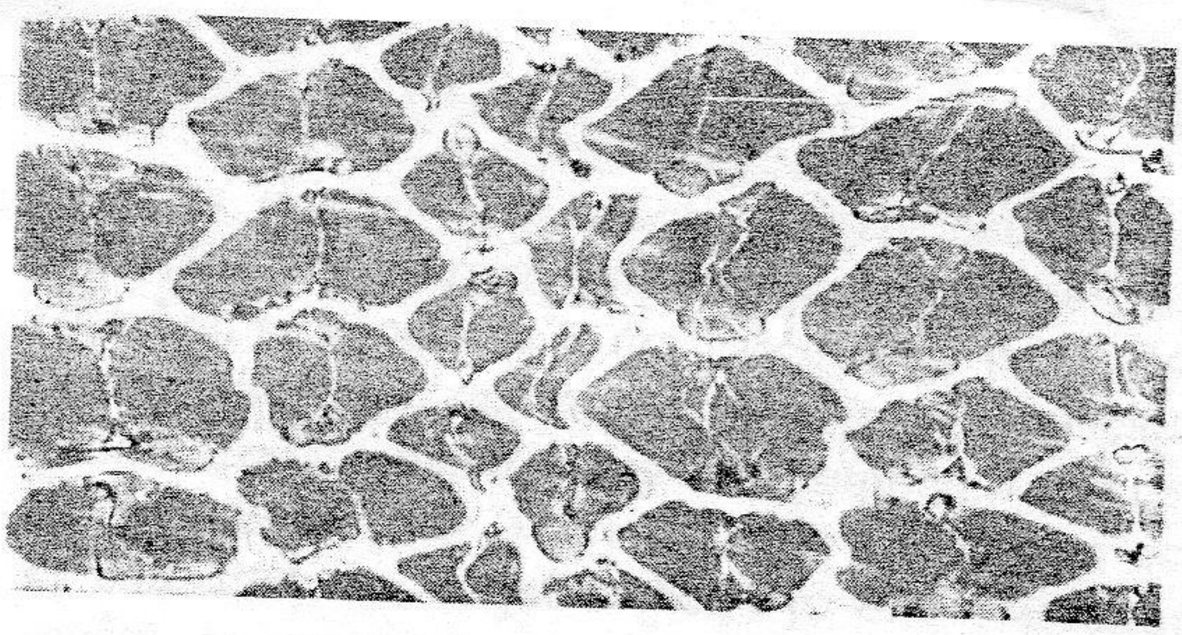


Figura 16.7. Corteza conservada como vitrita. × 350 *(C. E. Marshall).*

sino que tiene un vivo color pardo dorado o pardo rojizo. Se observa que está formada por corteza o madera, y cada banda represénta un fragmento único. La figura 16.7 representa una muestra de vitrita típica, a gran aumento, en la que se conserva perfectamente la estructura celular de la corteza. El material corresponde claramente a la corteza humificada que se encuentra en la turba.

Un examen similar de la fusita también revela que está hecha de madera o corteza, pero sólo subsisten las membranas carbonizadas de las células, mientras que éstas están vacías u ocupadas por cenizas. Representa fibras leñosas y de otros tipos que no se humificaron, aunque no está claro cómo se alteraron hasta convertirse en carbón vegetal. Parte de la fusita debe proceder de restos carbonizados de bosques quemados, pero en su mayor parte parece ser que se formó después de quedar enterrada durante el proceso de «carbonización».

A diferencia de estos dos tipos, que son constituyentes de composición uniforme, la durita es un conjunto de diminutas partículas análogas al fango orgánico de la turba. Contiene las cubiertas resistentes de esporas más o menos rotas y aplastadas, fragmentos microscópicos de vitrita, lentejuelas o granitos de fusita y bolas de resina, englobados en una matriz oscura de residuos demasiado finamente macerados para que se puedan identificar sin la ayuda del microscopio electrónico. La figura 16.8 muestra la durita formada de microsporas (masculinas) y macrosporas (femeninas), englobadas en una matriz oscura. La clarita contiene los mismos ingredientes que la durita, pero en proporciones muy diferentes; abundantes bandas

Figura 16.8. Durita (carbón mate) con esporas. × 30 *(C. E. Marshall).*

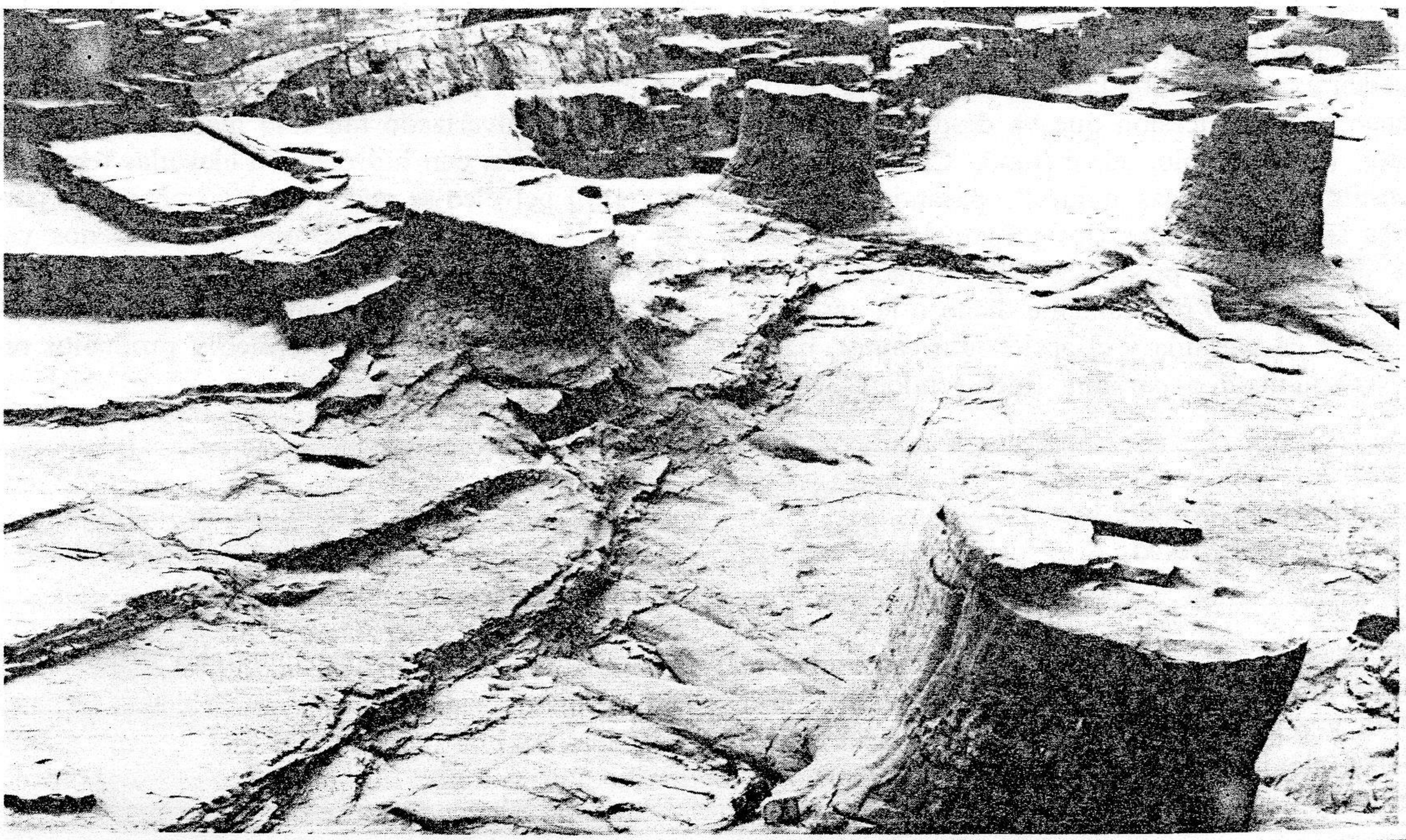
muy apretadas de vitrita están asociadas con láminas sumamente delgadas de material parecido a la durita. El carbón «cannel» se compone esencialmente de durita, especialmente rica en fundas de esporas y otros restos céreos y resinosos.

Se ha visto que lignitos y antracitas están compuestos de los mismos tipos estructurales que los carbonos bituminosos. La variación en las propiedades depende, en parte, de las proporciones de los ingredientes tipo y, en parte, del grado de alteración que han sufrido, o sea de la calidad del carbón. La fusita, por ejemplo, es muy inflamable, debido a que su friabilidad y gran porosidad facilitan la oxidación. Las explosiones de grisú —que al principio constituían un grave peligro para los mineros antes de que se tomaran precauciones— provienen de esta peligrosa propiedad. Las envolturas de las esporas y las resinas son ricas en hidrocarburos; por consiguiente, los carbones mate y los «cannels» producen mucho más gas y alquitrán que los lustrosos de calidades intermedias. Sin embargo, estos últimos son excelentes para los usos domésticos. El carbón de máquinas de vapor, adecuado para locomotoras y barcos, es de mejor calidad y de transición a la antracita, en que las raras esporas todavía detectables han quedado reducidas a espectros de restos carbonizados.

Vetas y yacimientos de carbón

El período de máxima formación de carbón fue el Carbonífero superior. Los movimientos terrestres hercinianos proporcionaron las extensas cuen-

Figura 16.9. Restos de un bosque carbonífero en que se ven troncos fósiles y raíces subdivididas de *Lepidodendron* arraigados en pizarras, Fossil Grove, Victoria Park, Glasgow; descubierto en 1882 y conservado como museo natural *(J. R. Stewart).*



cas subsidentes en las que se depositaron los sedimentos y vetas de carbón de Coal Measures de Gran Bretaña y una larga faja que atraviesa Norteamérica (bordeando los Apalaches), las islas Británicas y parte de Europa y Asia, donde el clima era cálido y la vegetación exuberante.

Las plantas terrestres capaces de conservarse no hicieron su tímida aparición hasta fines del Silúrico. Sin embargo, durante el Carbonífero, ya se había desarrollado una flora rica y prolífica, y de este período se conocen más de tres mil especies. Los principales productores de carbón eran árboles de selva muy altos (*Lepidodendron,* figura 16.9, y *Sigillaria,* con raíces muy extendidas llamadas *Stigmaria*) que alcanzaban alturas de hasta 30 m; y juncos gigantescos llamados *Calamites* (antepasados de los modestos esquisetos o colas de caballo actuales) que florecieron en espesuras parecidas a los cañaverales de bambú hasta alturas de 15 m o más; junto con un sotobosque de pequeñas plantas de pantano y helechos, así como de delicadas plantas de hábitos rastreros o trepadores (fig. 16.10). Ni flores ni pájaros animaban estas sombrías junglas, pero había abundantes insectos, algunos de los cuales eran también de tamaño extraordinario.

Figura 16.10. Reconstrucción de un bosque carbonífero.

Prácticamente todas las vetas de carbón bituminoso y de antracita tienen determinadas características de las que se deduce que cada veta representa el emplazamiento real en el pantano, en el que vivía y murió la vegetación que dio lugar al carbón.

a) El «asiento» que forma el fondo de una veta puede ser una arcilla refractaria de alto grado (útil para fabricar ladrillos refractarios). Es un suelo fósil, atravesado por numerosísimas raicillas de las primeras plantas que colonizaron la ciénaga, y localmente contiene huellas de raíces de *Stigmaria,* a menudo en posición de crecimiento. Los troncos o bien se pudrieron por encima del nivel del agua o cayeron en la charca para contribuir a formar la parte inferior de la veta.

b) El techo de la veta a veces contiene huellas de troncos de grandes árboles de la selva. Representan la generación que quedó inundada cuando las condiciones pantanosas terminaron con la inundación general.

c) Las vetas pueden ser muy extensas, y a veces cubren regiones de muchos miles de kilómetros cuadrados.

d) Las vetas están localmente interrumpidas por «cauces de drenaje», o sea, por canales rellenos de arenisca que corresponden a los cursos de agua que fluían por los bosques pantanosos, como las digitaciones y canales tributarios de los deltas modernos (fig. 16.4).

e) Los carbones de tipos normales no contienen restos de peces ni otros fósiles de animales acuáticos y (exceptuando algunas bandas de durita) no están contaminados con sedimentos fangosos. Las cenizas residuales de la combustión del carbón proceden o bien de la propia vegetación o de minerales carbonatados y piritas que se debieron depositar en grietas con la ayuda de las aguas subterráneas que se filtraban. Sin embargo, las vetas y bandas del tipo durita dejan un poco de ceniza sedimentaria. Estos carbones mates aparentemente se acumularon en zonas de aguas estancadas, en las que se introdujeron cantidades limitadas de sedimento fino en las crecidas de los cursos de agua del delta.

En los carbones especiales —«cannels» y «bogheads»— el sedimento fangoso es mucho más

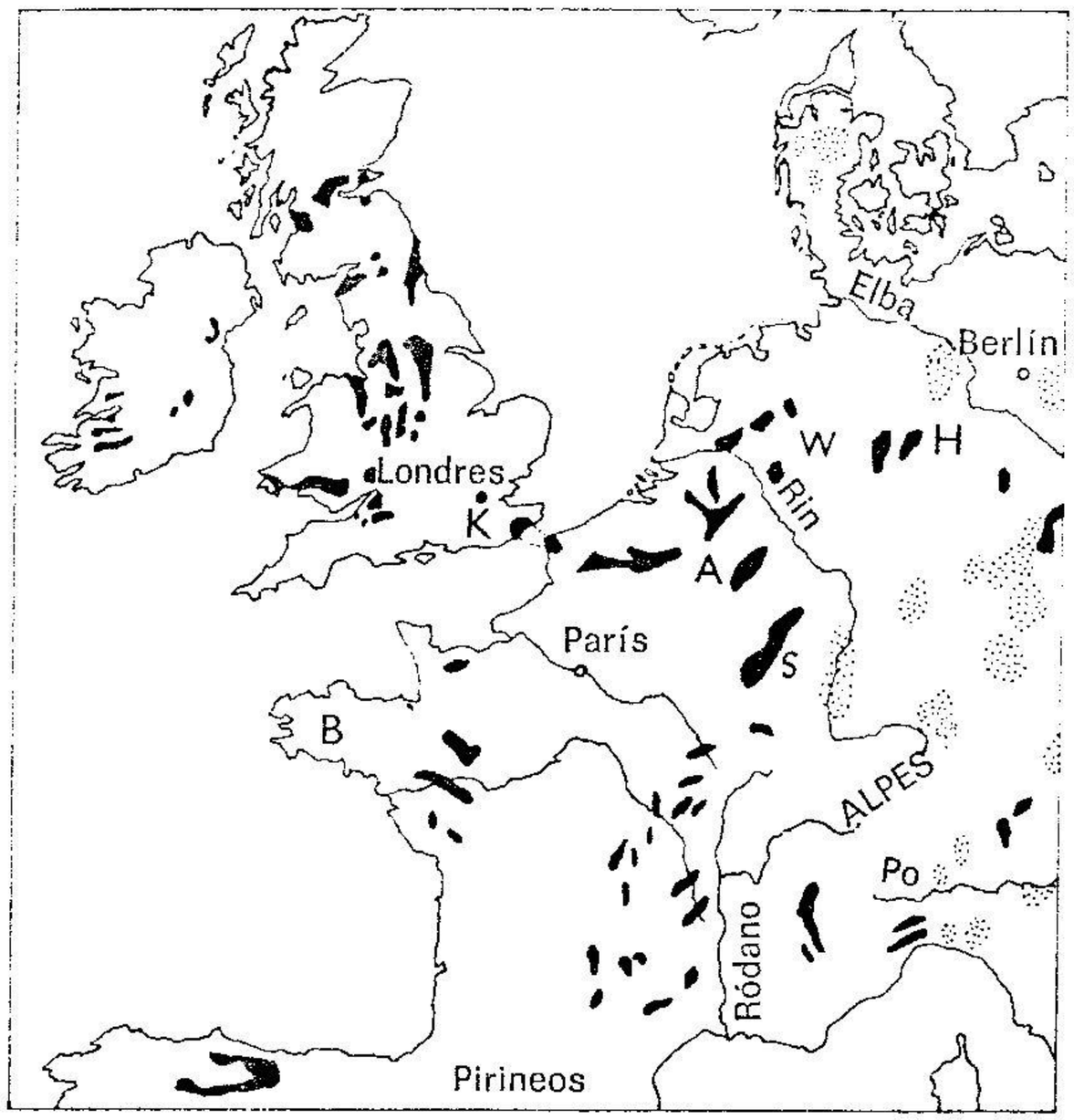


Figura 16.11. Mapa de los yacimientos de carbón (algunos ocultos por estratos posteriores) de Europa occidental. En negro, Carbonífero; en punteado, Cretácico. A mediados del Carbonífero, el frente septentrional de una cordillera herciniana se extendía desde Bretaña (B), por las Ardenas (A) a los Montes Harz (H) y más allá. Los criaderos de carbón se depositaron en una serie de cuencas externas situadas al norte (o sea, desde el sur de Gales y Kent a Westphalia, W, incluyendo el Ruhr) y en una serie de cuencas intramontañosas al sur (como la de Saar, S).

abundante que en la durita. Además, estas variedades contienen restos de peces y de otros organismos acuáticos. El agua en la que se acumuló el limo contaminado de barro inorgánico no estaba estancada, sino que se renovaba y oxigenaba constantemente. Evidentemente, estos carbones no se formaron *in situ* sino a partir de restos de plantas arrastrados por el viento y el agua corriente a lagos bien drenados. Estas condiciones debían darse localmente en los agujeros de una superficie de turba que empezaba a hundirse. Como era de esperar se han encontrado delgados lentejones de «cannel», de extensión reducida, en el techo de muchas vetas de carbón normal.

En los yacimientos del Carbonífero superior cada veta forma parte de una sucesión característica de sedimentos que comúnmente se repite docenas de veces, y en algunas localidades, centenares de veces. De ordinario, una veta de carbón está cubierta de pizarras que se consideran de origen no marino. En ellas son frecuentes hojas y bivalvos no marinos fósiles, aunque muy ocasionalmente (y significativamente) hay fauna marina. Más arriba, las pizarras se hacen arenosas y pasan a areniscas, a veces con interrupciones pizarrosas. Luego sigue la base de asentamiento subyacente a la siguiente veta de carbón. Este tipo de secuencia implica una alternancia de deposición clástica y crecimiento vegetal a nivel del mar, o ligeramente por encima de él.

Las regiones subsidentes llegaron a convertirse en profundas cuencas tectónicas situadas entre zonas que se elevaban y que alimentaron las cuencas con sedimentos y las mantuvieron llenas. La base de parte del yacimiento carbonífero de Gales del Sur en conjunto bajó más de 3000 m. Los yacimientos de Gales del Sur y alrededores originariamente formaron parte de una cuenca alargada, que se extendía mucho más allá a través del sur de Inglaterra. Hacia el norte, una alineación persistente de terrenos más elevados, a menudo denominada umbral central (Midland Barrier) separaba esta cuenca meridional de una vasta zona de depresiones conectadas que incluían los grupos de yacimientos septentrionales (fig. 16.11).

En aquel tiempo, la región británica y las partes adyacentes europeas estaban plegándose en forma de depresiones y elevaciones alternantes, como consecuencia de los movimientos verticales —hundimientos y levantamientos complementarios— asociados de algún modo a la orogénesis herciniana que entonces estaba desarrollándose activamente más al sur. Posteriormente, las propias cuencas rellenas se ondularon, plegaron y fallaron. Las partes predominantemente abombadas hacia arriba quedaron expuestas a la erosión y, gradualmente, perdieron del todo o en parte sus vetas de carbón. Por el contrario, las abombadas hacia abajo y las hundidas por fallas quedaron enterradas a profundidades aún mayores bajo las sucesivas acumulaciones de sedimentos pérmicos, triásicos y posteriores. Así se conservaron los criaderos de carbón aislados actuales. Levantamientos sucesivos, ocurridos principalmente en el Terciario, han hecho posible la remoción por la erosión de gran parte de la cubierta protectora. En muchas localidades (fig. 16.11) los criaderos fallados y plegados están expuestos en la superficie actual. En otras, como a lo largo de la costa de

Durham y al este de los yacimientos de Yorkshire y Nottingham, la prolongación subterránea de los yacimientos expuestos está oculta bajo estratos pérmicos o triásicos. El pequeño yacimiento del extremo sudeste de Kent está totalmente oculto.

Petróleo

El petróleo (del griego, *petra*, roca, y del latín, *oleum*, aceite) es el término general que sirve para designar todos los hidrocarburos naturales —ya sean gaseosos, líquidos o sólidos— que se encuentran en las rocas. Sin embargo, en el lenguaje corriente se suele referir más particularmente a los aceites líquidos. Las variedades gaseosas se distinguen con el nombre de *gas natural*. Las variedades muy viscosas o sólidas se llaman *betún* o *asfalto*, pero este último término se aplica asimismo a los residuos bituminosos que deja el petróleo al ser refinado y a los materiales naturales y artificiales de pavimentación compuestos de arena, grava, etc., con un cemento bituminoso.

El petróleo se compone de una mezcla extremadamente complicada de centenares de hidrocarburos diferentes, por lo general acompañados de pequeñas cantidades de compuestos afines que contienen nitrógeno, azufre u oxígeno. Los hidrocarburos se clasifican en cierto número de series naturales, de las cuales la serie parafínica es la más conocida. Sus miembros, todos los cuales pueden expresarse por la fórmula C_nH_{2n+2}, se ordenan en una sucesión que va desde los gases ligeros (por ejemplo, el metano, CH_4, principal constituyente del gas natural), pasando por una larga serie de líquidos (los principales ingredientes de sucesivos productos de destilación, tales como el petróleo propiamente dicho o la gasolina, el aceite de parafina y el aceite lubricante), hasta la cera mineral o parafina (incluyendo $C_{20}H_{42}$ y términos más elevados). Los aceites brutos en que predominan estos hidrocarburos se dice que tienen base parafínica; generalmente tienen color claro, con cierto matiz amarillo o verdoso. Los aceites de colores pardo oscuro y verdoso contienen de ordinario una elevada proporción de términos de la serie nafténica, la composición de cuyos miembros es del tipo C_nH_{2n}. Éstos proporcionan aceites pesados combustibles («fuel-oils»), y, como al ser refinados dejan un residuo asfáltico oscuro, se dice que tienen base asfáltica. Las variedades intermedias tienen una base mixta de parafina y asfalto. En todos los petróleos crudos existen asimismo proporciones menores de otras varias series, entre ellas el acetileno y sus términos superiores, C_nH_{2n-2} y una gran variedad de hidrocarburos aromáticos, de los cuales puede servir de ejemplo la serie del benceno, de fórmula general C_nH_{2n-6}.

Para evitar toda posible confusión debe quedar bien entendido que ni los esquistos bituminosos ni los carbones «cannel» y «boghead» contienen petróleo en estado natural. Si lo tuvieran, éste sería soluble en sulfuro de carbono. No obstante, contienen *sustancias pirobituminosas* o kerosenos, las cuales, por la acción del calor, se pueden desdoblar en aceite y betunes. Tales depósitos pueden suministrar un grupo de productos petrolíferos por destilación destructiva. El petróleo y los productos relacionados con él se pueden obtener en cantidades comerciales a partir del carbón ordinario y pulverizado tan sólo mediante procesos de fluidización con hidrógeno a elevadas temperaturas. El petróleo se puede también obtener a partir de los aceites pesados, que tienen menos valor, mediante procesos de hidrogenación similares, aunque menos complicados. El cuadro siguiente resume las fuentes del petróleo y productos relacionados con el mismo:

Depósitos bituminosos de petróleo	*Depósitos pirobituminosos que requieren destilación destructiva*	*Depósitos de carbón que requieren hidrogenación*
Gas natural	Carbones especiales:	Carbones minerales ordinarios
Aceite mineral o crudo	«Cannels»	
Betún y cera mineral	«Bogheads»	
Arenas alquitranadas y asfalto	Pizarras bituminosas	—

Siendo fluidos, el petróleo y el gas se comportan muy análogamente a las aguas subterráneas. Ocupan los intersticios de rocas permeables tales como la arena y la arenisca así como las calizas cavernosas o fisuradas, en aquellos lugares en que estas «*rocas almacén*» están convenientemente confinadas por rocas impermeables, de modo que el petróleo quede encerrado entre ellas. Las acumulaciones en escala suficiente para recompensar los gastos de perforación de los pozos se denominan yacimientos de gas o de petróleo. No obstante, el yacimiento petrolífero es sencillamente la parte de una formación sedimentaria que contiene petróleo o gas en lugar de agua subterránea.

Origen del petróleo

A diferencia del carbón, el petróleo no conserva consigo evidencia visible de la naturaleza del material que le dio origen. Se ha sugerido, como posibilidad meramente especulativa, que el petróleo puede haberse formado por procesos volcánicos o químicos de profundidad en la corteza terrestre, comparables a la producción de acetileno por la acción del agua sobre el carburo de calcio. Pero estas hipótesis son totalmente incompatibles con la distribución geológica del petróleo y con ciertas particularidades de su composición y propiedades. Todos los indicios coinciden de modo convincente en señalar un origen orgánico.

a) Algunos de los constituyentes del petróleo tienen la propiedad de alterar la dirección de vibración de los rayos luminosos. Esta «*actividad óptica*» es característica de muchas sustancias producidas por plantas y animales, pero nunca es compartida por compuestos análogos generados por reacciones puramente químicas.

b) Entre los constituyentes menores del petróleo se incluyen las *porfirinas* (formadas a partir de la clorofila o de los pigmentos correspondientes de origen animal) y otros compuestos que pueden extraerse de plantas y animales con disolventes orgánicos. La mayoría de ellos, y en especial las porfirinas, se destruyen rápidamente en presencia de oxígeno. Su persistencia en el petróleo indica que éste debe haberse originado en un ambiente carente de oxígeno.

c) La existencia de yacimientos petrolíferos en sedimentos precarboníferos (y tan antiguos como los ordovícicos) sugiere que las plantas terrestres no fueron esenciales en la formación del petróleo y esta suposición se refuerza por el hecho de que en ningún sitio se ha seguido una conexión lateral significativa entre las vetas de carbón y los yacimientos petrolíferos. Ambos pueden presentarse en contacto o asociados por algún accidente o por fallas, y uno puede estar situado sobre el otro en una serie de estratos variados, pero en ningún caso la asociación tiene nada que ver con el origen del petróleo. Los restos de vegetación terrestre arrastrados y sedimentados en el mar por grandes ríos pueden haber contribuido en algo a la formación de petróleo, pero ésta sería sólo una fuente secundaria frente a las contribuciones hechas por los residuos orgánicos de diatomeas y otras algas marinas y de materia animal no consumida. La celulosa y la lignina, tan importantes en la génesis del carbón, aparentemente son poco importantes como fuentes de petróleo. La mayoría de los hidrocarburos extraídos de los sedimentos marinos, tanto recientes como antiguos, incluyen constituyentes que son idénticos o similares a los que producen los animales y vegetales marinos, pero que no se encuentran en la celulosa o la lignina.

d) Las investigaciones de los residuos orgánicos de muestras de sedimentos obtenidas en perforaciones del fondo del golfo de México y del mar Negro muestran que, de los estadios de formación de petróleo, por lo menos los iniciales se están produciendo actualmente. La actividad bacteriana largo tiempo mantenida es una de las condiciones esenciales. Aunque en los fangos más recientes no se detectan hidrocarburos, éstos aparecen gradualmente a poco más de un metro bajo el fondo marino. Las dataciones de materia orgánica (por el método del radiocarbono) muestran que los primeros estadios detectables de transformación en petróleo requieren de 3000 a 9000 años.

e) Con la excepción de casos accidentales, el petróleo no va asociado a volcanes ni a rocas ígneas. Al oeste de Edimburgo, por ejemplo, las pizarras bituminosas fueron invadidas por intrusiones y chimeneas volcánicas, con resultados comparables a los que se obtienen cuando se destilan pizarras bituminosas. El petróleo, así liberado por metamorfismo, debió de emigrar naturalmente hacia las areniscas que se encuentran encima, y to-

davía en algunos casos se ha encontrado en ellas. Sin embargo, ningún campo petrolífero de importancia se ha originado de este modo. Alrededor del 70 por ciento de los actualmente conocidos en el mundo entero están emplazados en sedimentos marinos de edad cretácica y terciaria, generalmente a lo largo de los flancos y en las regiones menos profundamente plegadas de las zonas orogénicas. La mayor parte de los campos petrolíferos restantes se encuentran en sedimentos paleozoicos (en Norteamérica y la URSS), o en las capas verticalizadas adyacentes a los domos de sal.

Las diversas clases de indicios llevan todas a la conclusión de que el petróleo se originó a partir de la materia orgánica de sedimentos fangosos depositados en regiones deprimidas del fondo del mar, donde el agua estaba estancada y era deficiente en oxígeno. Es de esperar que en estas condiciones las bacterias anaeróbicas extraían oxígeno de la materia orgánica, transformándola en sustancias grasas y parafínicas, molécula a molécula. Los términos más livianos de la serie de las parafinas y de otros hidrocarburos parecen ser derivados posteriores, producidos posiblemente por algún tipo de refinado natural llevado a cabo por el aumento de presión y temperatura durante el proceso de ir quedando enterrados, juntamente con la actividad bacteriana continuada. Se sabe que hay bacterias en las aguas subterráneas profundamente enterradas de determinados campos petrolíferos. Finalmente, el tiempo, que geológicamente es tan largo, es, con toda seguridad, un requisito fundamental.

Migración y concentración del petróleo

Los sedimentos en los que se originó el petróleo se llama *roca madre,* distinguiéndose de la *roca almacén* en que el petróleo y el gas se encuentran ahora a escala comercial. La roca almacén contiene mucho más petróleo del que probablemente pueda haberse originado en su interior y, además, suele contener fósiles que indican deposición en aguas oxigenadas, donde no hubieran podido sobrevivir cantidades apreciables de materia orgánica. Un yacimiento petrolífero es, en realidad, una concentración de petróleo que ha emigrado de la roca madre a lugares donde pudiera madurar y acumularse.

Las capas de rocas madres tales como arcilla y pizarra, son actualmente compactas e impermeables. Pero, cuando todavía no estaban consolidadas, contenían una elevada proporción de agua marina y llevaban glóbulos de aceite en estado de dispersión. Durante esta fase, más tarde o más temprano, llegó a ser posible la circulación de los fluidos mezclados, en respuesta a diferencias de presión producidas por la variación local de la carga media o, más efectivamente, por movimientos terrestres. A medida que las capas de roca madre se fueron comprimiendo, los fluidos escurridos pasaron a formaciones de poros más gruesos, tales como las arenas. Una vez que el aceite se ha trasladado a estas capas permeables puede emigrar a través de ellas a lo largo de enormes distancias pero no puede escapar de allí, a menos que las rocas impermeables que las cubren estén fisuradas. Cuando la mezcla de fluidos encuentra a su paso un sedimento con poros muy finos, el agua puede filtrarse lentamente a través de él, pero debido a que tiene una tensión superficial muy diferente, el aceite queda retenido. En el interior de la arena u otra roca almacén, el aceite se desplaza hacia arriba a través del agua hasta que tropieza con una barrera impermeable y se acumula allí.

En general, pues, el aceite emigra hacia fuera y hacia arriba desde las rocas madre, pasa a rocas almacén de gruesos poros o fisuradas, se eleva hasta el nivel más alto posible y se acumula formando el yacimiento de aceite dondequiera que la estructura provea una trampa que impida una ulterior migración. El gas, si se presenta en exceso con respecto a la cantidad que el petróleo puede contener en solución, burbujea en el techo del yacimiento y forma allí una *cámara* de gas sobre la de aceite. Debajo del yacimiento, los espacios porosos están ocupados por agua subterránea (con frecuencia salada), la cual se encuentra comúnmente bajo considerable presión hidrostática. Si la presión y el contenido en gas son suficientemente elevados, el aceite mana a modo de surtidor cuando el yacimiento es alcanzado por el sondeo. Pero cuando las condiciones de presión son insuficientes para arrastrar el aceite hasta la superficie —o se produce una caída de la presión inicial— es necesario acudir al empleo de bombas para extraerlo.

De acuerdo con los principios de concentración del aceite, una cúpula o anticlinal con sedimentos

permeables e impermeables alternantes constituye una trampa eficaz para el petróleo que emigra hacia ella (figs. 16.12 y 16.13 *[a]*). Los amplios anticlinales aislados, rodeados de extensos terrenos susceptibles de impregnación, tienen muchas

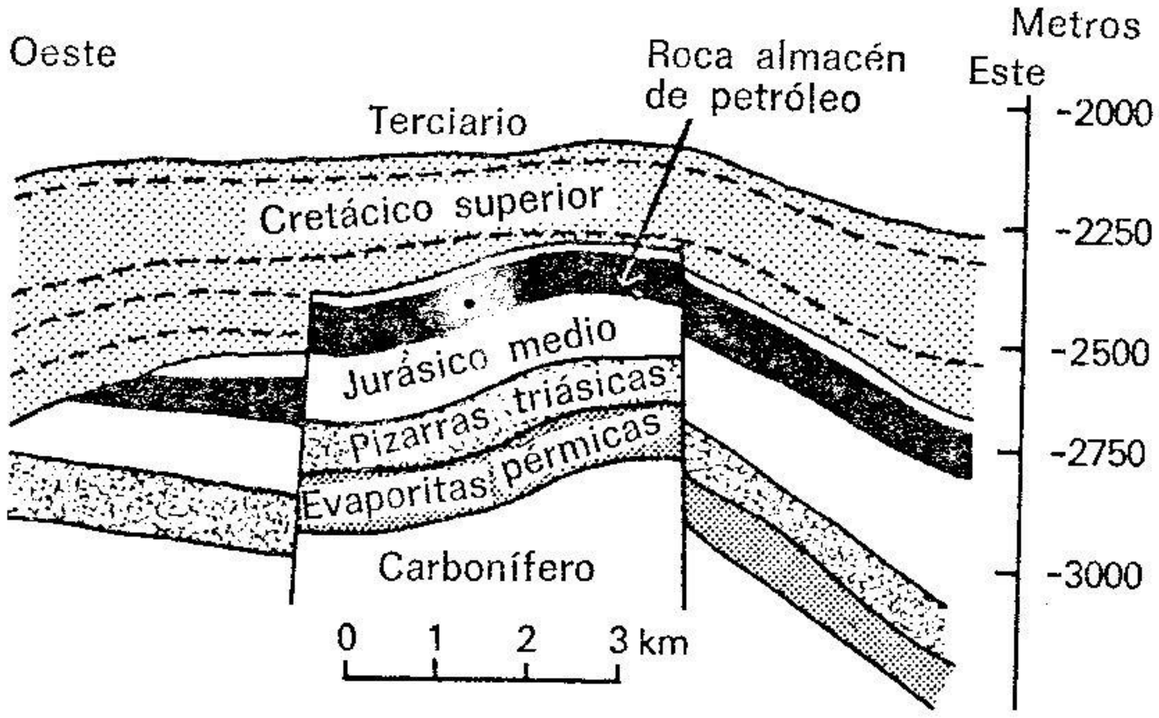


Figura 16.12. Corte geológico del campo petrolífero Piper, situado 200 km al este de Wick, Escocia, que representa la estructura característica en domo con bloques fallados de los yacimientos petrolíferos del mar del Norte. En el campo petrolífero Piper, los bloques fallados empezaron a moverse durante el Jurásico inferior o quizás antes, y se estabilizaron a principios del Cretácico superior. La roca almacén aquí es una arenisca del Jurásico superior (Oxfordiense) sellada por pizarras del Jurásico superior (Kimmeridgiense) y, localmente, por pizarras y margas cretácicas discordantes que la recubren y con la que se solapan. (*Según P. E. Kent,* 1975).

más posibilidades de ser productivos que los pliegues más densamente apretados. Estos últimos, no solamente tienen que repartirse un suministro limitado, sino que es probable que estén demasiado rotos y fisurados para retener el aceite y el gas que lleguen a los mismos. Entre las estructuras que almacenan petróleo del mar del Norte hay anticlinales abiertos, bloques fallados y combinaciones de ambos (fig. 16.12).

Aunque la «teoría anticlinal» de la concentración del petróleo dominó en la exploración petrolífera durante muchos años, gradualmente se ha comprobado que los anticlinales no son las únicas trampas favorables. Los campos petrolíferos de Pennsylvania, por ejemplo, que fueron los primeros en ser descubiertos, se hallan en una ancha cuenca de sedimentación en la cual las formaciones todavía permanecen prácticamente horizontales en grandes extensiones. Aquí los depósitos de aceite ocupan fajas lenticulares de arenisca porosa que pasa lateral y verticalmente, a pizarras. Los límites arenisca/pizarra sirvieron como filtro que retenía el petróleo y permitía el paso de agua subterránea, que escapaba. Así, el petróleo se concentró y quedó atrapado en una serie de cubiertas impermeables (fig. 16.13 *[c]*). Los depósitos de aceite que ocupan el extremo superior de estratos almacén inclinados son asimismo de gran importancia. Las capas inclinadas pueden pasar

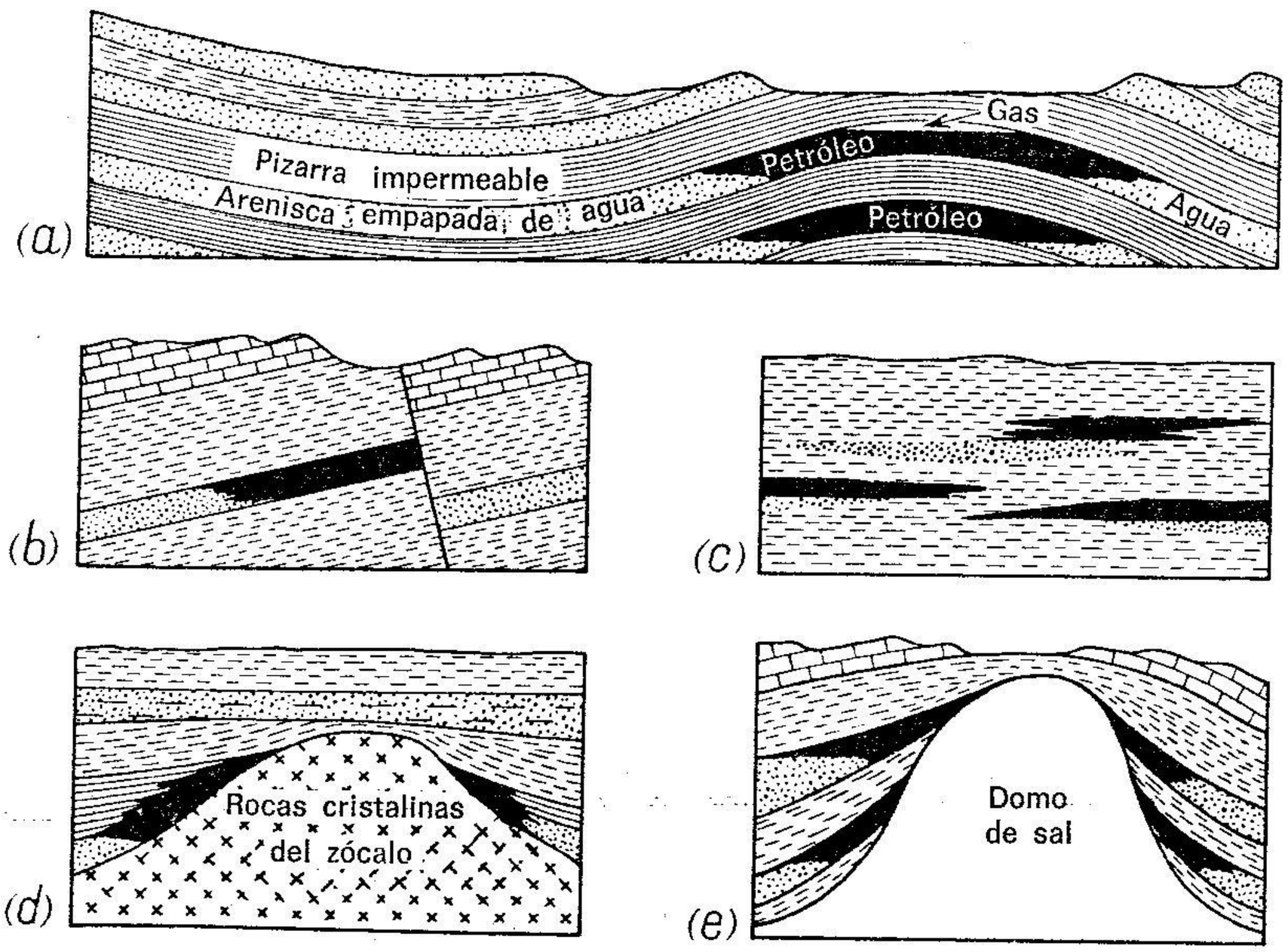


Figura 16.13. Cortes que representan diversos tipos de trampas estructurales favorables para la acumulación de petróleo y gas (el gas sólo se ha representado en (*a*)).

lateralmente a pizarras o pueden quedar bruscamente cortadas por una barrera impermeable. El obstáculo puede ser una falla que cierre con una capa impermeable la capa almacén (fig. 16.13 *[b]*); o una colina perteneciente a una antigua superficie del terreno, recubierta en discordancia y enterrada por una serie posterior de estratos petrolíferos (fig. 16.13 *[d]*); o un domo de sal que ha perforado y ascendido a través de una serie de sedimentos de gran espesor. La figura 16.13 *[e]* representa cómo el petróleo se acumula junto a las paredes de un domo de sal. El petróleo también puede quedar confinado por fallas producidas en las rocas adyacentes debidas al ascenso de la sal intrusiva (cf. fig. 10.3) y, finalmente, puede acumularse en los sedimentos abombados del techo del domo.

El petróleo no está necesariamente, ni siquiera generalmente, confinado en una capa almacén única en un campo dado. Cualquier formación apropiadamente situada puede haber sido alimentada, ya sea por una roca madre primaria, ya sea desde un depósito subyacente, del cual el petróleo se ha escapado hacia arriba atravesando las fracturas de las capas impermeables intermedias. El gas, en particular, emigra fácilmente hacia niveles más altos, y en muchos lugares se ha acumulado en grandes cantidades en los llamados «campos de gas». Esto refleja la tendencia natural de algunas variedades de petróleo a diferenciarse en fracciones asfáltica y gaseosa. Si el estrato que sirve de roca almacén comienza a gotear después que este fraccionamiento se haya llevado a cabo, el gas móvil se traslada y deja atrás el asfalto viscoso. Al principio, la mayor parte del gas encontrado por perforación se descargaba en la atmósfera y se perdía. Pero ahora se le busca con interés, no solamente porque constituye una fuente de energía e iluminación de fácil distribución, sino además porque sus constituyentes más pesados pueden ser condensados en petróleo.

Descubrimiento de campos petrolíferos

Doquiera que haya grietas en la cubierta de un reservorio que constituyan vías de salida a la superficie, es inevitable el escape de gas y petróleo. Además, la denudación puede producir un adelgazamiento de las rocas de cobertera hasta que el gas pueda forzar el paso a través del techo y así abrir un camino para el subsiguiente escape de petróleo. Así pues, los indicios más evidentes de que una región es o ha sido petrolífera son: *a*) impregnaciones y emanaciones de gas o petróleo, y *b*) depósitos superficiales o vetas de asfalto y de otros residuos más o menos «sólidos» del petróleo, que quedan después de la pérdida por evaporación de los constituyentes volátiles.

El gas inflamable puede verse burbujear a través del agua de fuentes y pozos o torrentes. En algunas localidades el gas escapa a una escala más espectacular. Durante mucho tiempo los Adoradores del Fuego miraron con veneración los surtidores llameantes tales como los de la costa del Caspio cerca de Bakú. Los famosos «Fuegos Eternos» de Mesopotamia actualmente todavía siguen ardiendo igual como lo hacían en tiempos de Nabucodonosor (fig. 16.14). El «horno ardiente» al que fueron echados Shadrach, Meshach y Abednego probablemente eran una filtración ardiente de gas natural.

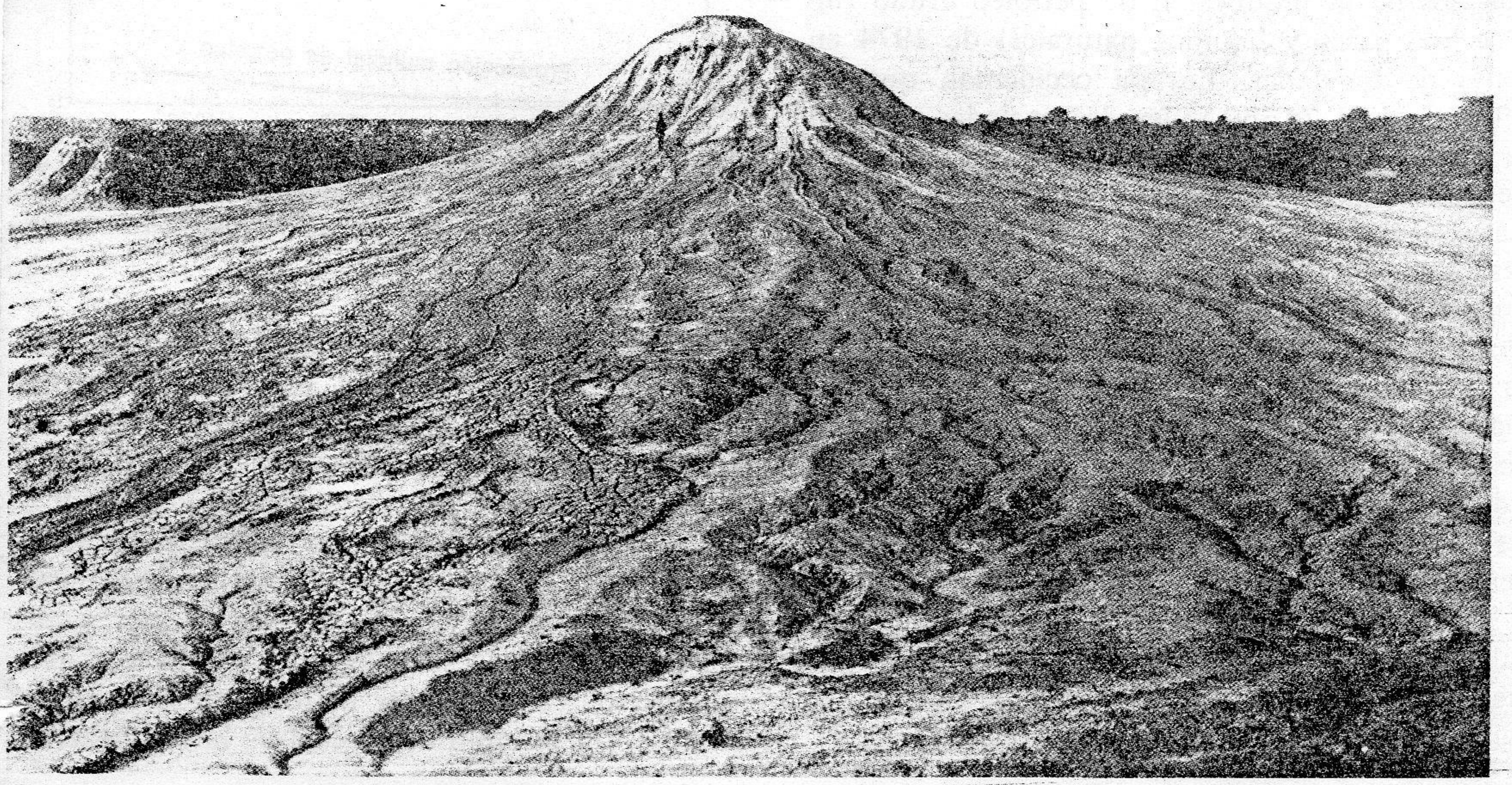
Allí donde gas a alta presión irrumpe a través de estratos empapados de agua y arcilla, arrastra barro húmedo y lo esparce alrededor de la boca de salida hasta que se construye un montículo con un cráter en la cumbre. Hileras y grupos de estos «volcanes de fango», presentes sobre las intrusiones diapíricas fangosas, o en las crestas de anticlinales, o a lo largo de fallas, se conocen bien en Birmania (fig. 16.15), Trinidad, California y otras varias localidades. La erupción puede ser continua o espasmódica, según la acumulación de presión en el gas y la naturaleza de la obstrucción a superar. Exceptuando cierta similitud en el mecanismo del gas, no hay conexión con la actividad volcánica ordinaria.

En algunas localidades hay fuentes de las que mana petróleo en superficie, pero lo más frecuente es que las exudaciones sean perezosas, y entonces el petróleo sólo se ve como una película irisada sobre el agua. Los «indicios» de mayor extensión son las arenas cementadas con «alquitrán» residual (betún) o los depósitos localizados de asfalto más concentrado. Estos residuos pueden llegar a obstruir los escapes e impedir ulteriores pérdidas de material más profundo; o, por el contrario, pueden también constituir los residuos de un yacimiento de petróleo ya extinguido.

La evidencia del uso del betún en Mesopota-

Figura 16.14. Filtración ardiente de gas natural, Irak *(Compañía Petrolífera Iraquí, Ltd).*

Figura 16.15. Volcán de fango mayor de Minbu, Birmania, y dos menores a la izquierda. A través de fango gris acuoso del cráter salen burbujas de casi un metro de diámetro que hacen derramar el fango por las laderas. Los conos de fango marcan la cima de una penetración diapírica de fango miocénico *(E. H. Pascoe, Servicio Geológico de la India).*



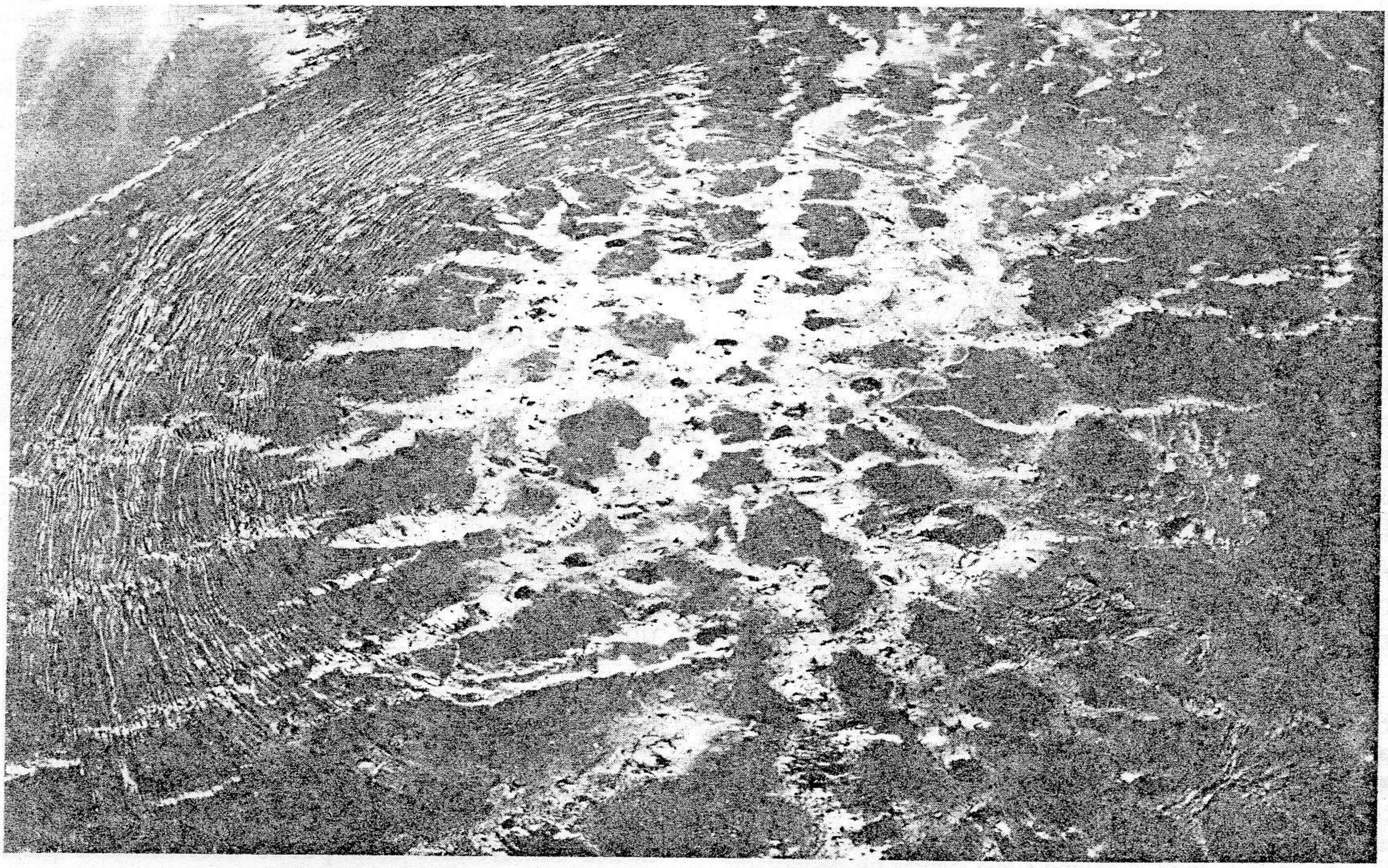


Figura 16.16. Célula de convección de asfalto en medio del lago de la Brea, SO de Trinidad. El asfalto es negro pardusco y contiene una cantidad variable, hasta de un tercio, de arena y arcilla. Aunque se comporta como un sólido y se rompe al ser golpeado con un martillo, fluye como un líquido bajo su propio peso. El doble comportamiento se ilustra aquí por las grietas de tensión centrales (zonas claras) debido al abombamiento y extensión sobre la corriente ascendente; y por el plegamiento concéntrico hacia la periferia, donde el flujo hacia fuera se hace más lento a medida que se acerca a la célula de convección adyacente *(H. H. Suter, «Colonial Geology and Mineral Resources»,* vol. 2, 1951, pág. 283).

mia se remonta a tiempos muy antiguos. Mucho antes de que Noé calafateara su arca con asfalto, los sumerios ya usaban el betún para cementar y pavimentar (hace unos 5500 años). Actualmente es de dominio general que el Oriente Medio está dotado de concentraciones fabulosas de petróleo que constituyen casi las dos terceras partes de las reservas mundiales conocidas.

Probablemente el yacimiento de asfalto mejor conocido es el célebre «lago de la Brea» de Trinidad (fig. 16.16). Aunque la isla la descubrió Colón en 1489, es improbable que los navegantes europeos tuvieran conocimiento del lago hasta que lo vio Léry, quien fue el primero que lo describió, en 1786. Como resultado de la extracción de más de seis millones de toneladas de asfalto en el siglo actual, la superficie ha descendido, aunque sólo unos 6 m. Si no fuera por el lento proceso de relleno desde una fuente subyacente, el descenso habría sido más del doble.

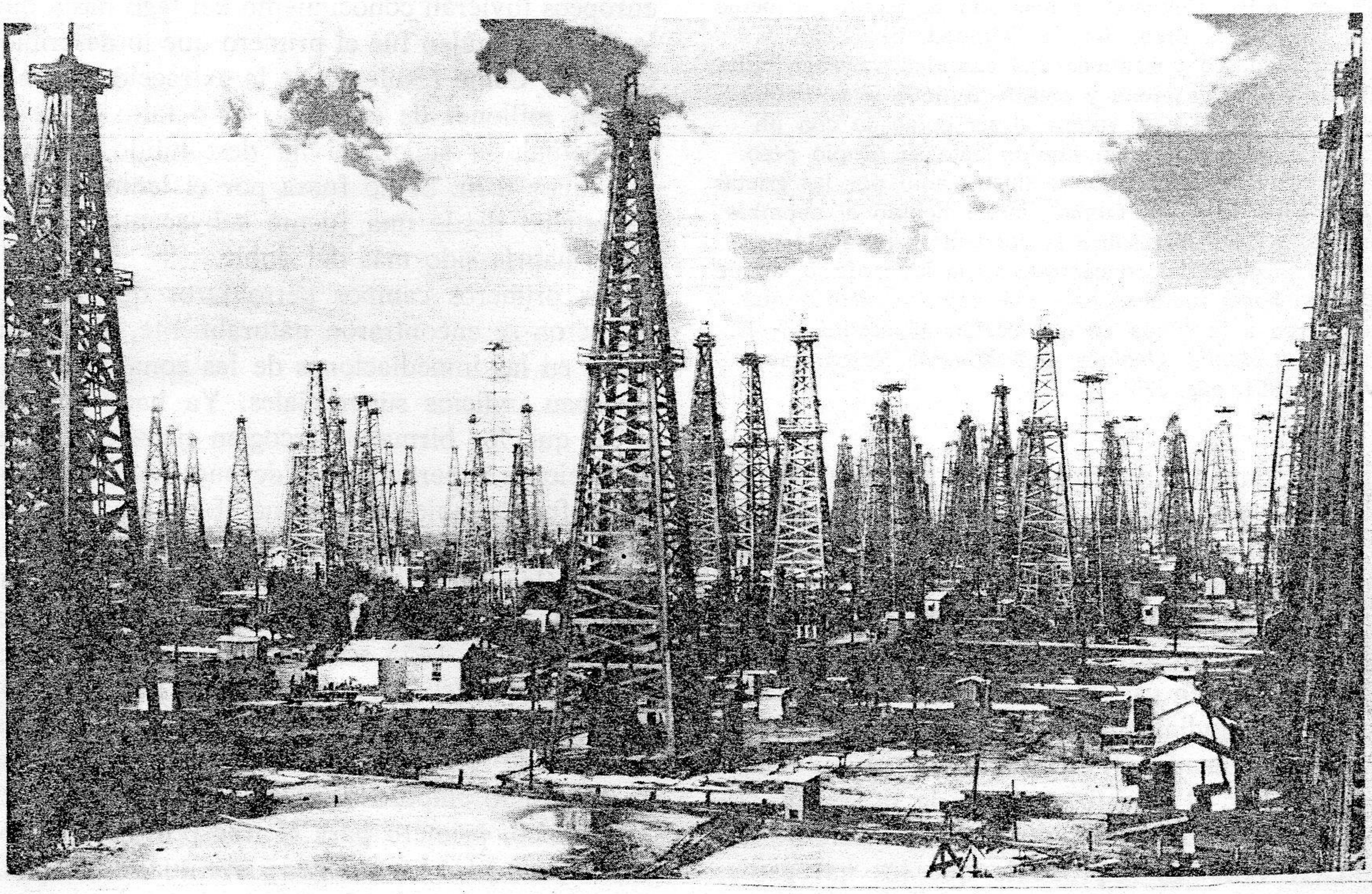
Los primeros campos petrolíferos que se descubrieron se encontraron naturalmente, al abrirse pozos en las inmediaciones de las zonas que presentaban indicios superficiales. Ya hace muchos siglos que los birmanos recogían petróleo en las exudaciones superficiales y, después, de pozos poco profundos abiertos a mano. El campo de Yenangyaung es el ejemplo clásico de concentración de petróleo en las arenas de un domo alargado. Oldham fue el primer geólogo que exploró la región y ya en 1855 señaló la importancia de las estructuras anticlinales como trampas de petróleo. Sin embargo, hasta 1900, apenas se solicitaban los servicios de los geólogos y a éstos se acudió después, cuando empezó a intensificarse la demanda de petróleo, primero para el transporte motorizado, después para los aviones y eventualmente para

fines bélicos y seguridad nacional. Entonces se puso de manifiesto que el descubrimiento sistemático de petróleo implica la investigación de trampas potenciales, o sea, exige el estudio geológico detallado de todas las regiones en las que es posible que el petróleo se encuentre oculto. La búsqueda de petróleo se convirtió en una empresa geológica.

Sin embargo, es obvio que, además de las estructuras favorables que pueden localizarse por los afloramientos en la superficie, debe haber algunas que no pueden detectarse así, y otras que están bajo el mar o cubiertas por selvas tropicales o pantanos, por extensiones aluviales, arcillas guijarros de origen glacial, arenas del desierto o loess. Los anticlinales y otras estructuras ocultas, como las colinas y domos de sal enterrados, ilustrados en la figura 16.13, se pueden detectar por las anomalías gravitatorias que producen. Estructuras significativas de todo tipo se pueden explorar por sus efectos sobre las ondas sísmicas artificiales (págs. 655-56). Las ondas sísmicas originadas al hacer estallar una carga de dinamita en el suelo, son reflejadas o refractadas hacia la superficie por las rocas que encuentran en profundidad, y se registran en sismógrafos situados a distancias adecuadas del punto de explosión. Por este método, se han localizado con éxito muchos centenares de domos de sal, por ejemplo. También se han ideado métodos magnéticos y eléctricos para la exploración de estructuras subterráneas. Actualmente la exploración petrolífera es una empresa conjunta de geofísicos y de geólogos.

El descubrimiento de una estructura favorable desde luego no constituye una garantía de que se encontrará petróleo. Por otra parte, la ausencia de indicios superficiales no constituye una prueba de que no se lo encontrará; puede ocurrir que el petróleo, si existe, esté tan bien confinado que no pueda escapar. Si hay o no petróleo en cantidades comerciales sólo puede determinarse perforando (fig. 16.17).

Figura 16.17. Enjambre de torres de perforación, campo petrolífero de Beaumont, Texas, que pone de manifiesto la devastadora competición de los años 30 cuando cada propietario de un terreno trataba de extraer la máxima cantidad de petróleo en el menor tiempo posible. A pesar de todo el campo sigue siendo un productor provechoso *(Ewing Galloway, N. Y.)*.



Algunos de los descubrimientos importantes se han producido, en ocasiones, accidentalmente, como cuando al abrirse pozos o minas para obtener agua o carbón salió petróleo en gas. Realmente, la industria petrolífera actual comenzó hace un siglo a consecuencia de que una perforación para agua en Pennsylvania, dio petróleo y agua salada. Esto ocurrió en 1848 y el petróleo se vendió con fines medicinales. En 1859 se abrió el primer pozo específicamente para sacar petróleo, y tal como se había previsto se encontró a una profundidad de sólo 21 m. El gas natural del oeste del Canadá, cuyas enormes reservas están bien probadas, manó por vez primera en 1883 cuando se esperaba encontrar agua para el ferrocarril pacífico canadiense, que entonces se construía. Además, siempre ha habido optimistas que arriesgan su capital y prueban suerte abriendo pozos sin garantías en sitios seleccionados sólo por corazonadas personales. Muy pocas de estas aventuras especulativas han tenido éxito, pero algunas de ellas han proporcionado beneficios fabulosos.

Producción y reservas de petróleo y carbón

La primera región productora de petróleo es Oriente Medio (1 083 240), la segunda es Norteamérica (592 690) y le sigue muy de cerca la región Chino-Soviética (537 580). Las cifras son cálculos de la producción de petróleo crudo (incluyendo gases y líquidos naturales) de 1974 en miles de toneladas. Europa occidental, que en 1974 produjo 20 350 miles de toneladas, está en la cola de la lista. La producción total mundial de 1974 superó los 2800 millones de toneladas. Las reservas recuperables en el mismo año ascendían a unos 91 500 millones de toneladas, de modo que, a la tasa de consumo de 1974, las reservas alcanzan para 35 años más. Una ojeada a la figura 16.18 muestra que la producción y el uso mundial del petróleo han estado permanentemente creciendo desde 1940, pero su crecimiento no ha sido tan violento como el de las reservas mundiales probadas, lo que constituye una prueba evidente de la eficacia de la cartografía geológica y la exploración geofísica. King Hubbert ha calculado que las reservas de petróleo seguirán aumentando mucho hasta 1995, después de lo cual van a disminuir rápidamente a medida que se

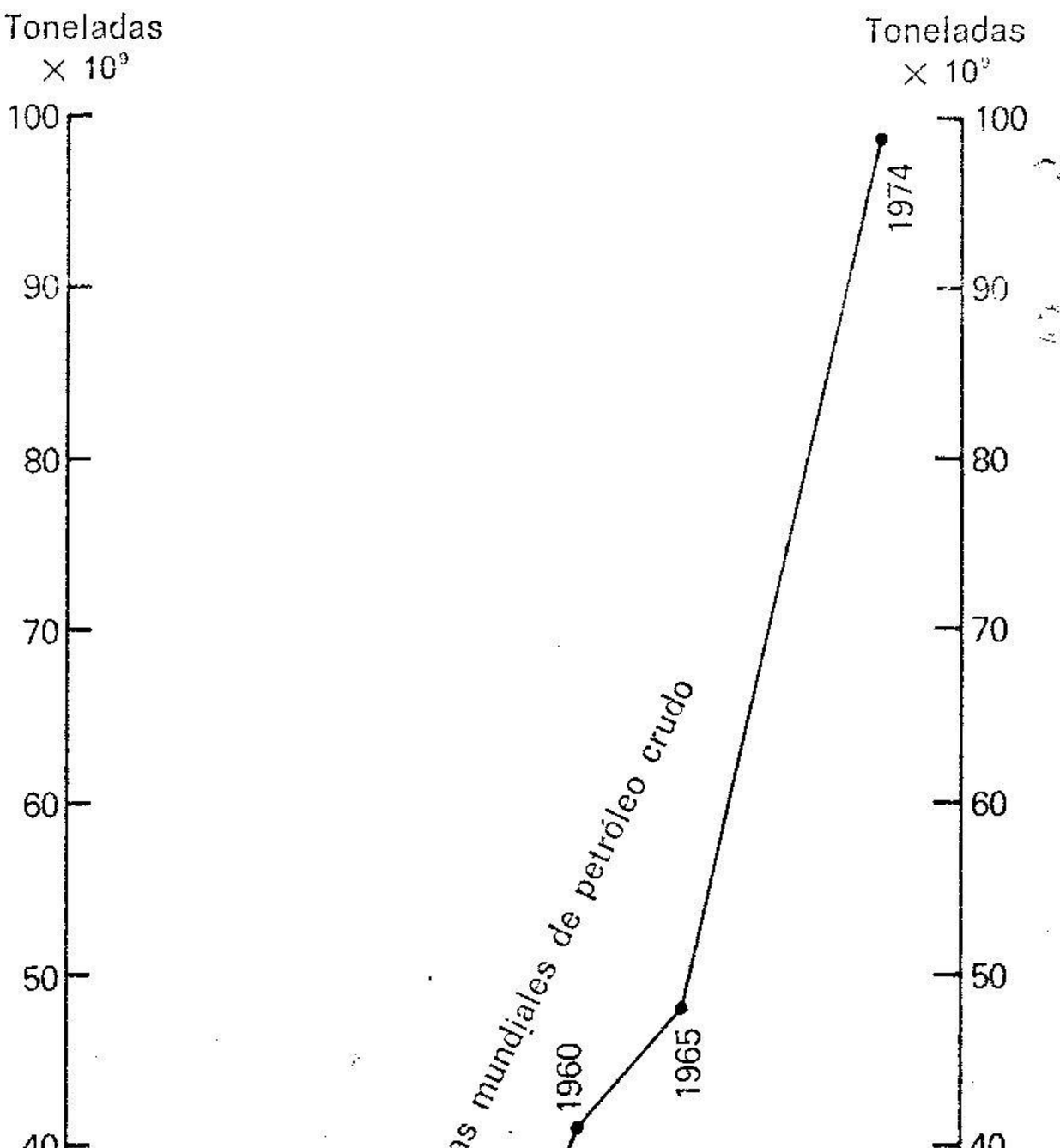


Figura 16.18. Comparación entre el uso del petróleo a escala mundial y las reservas mundiales conocidas de petróleo crudo en 1974 *(Datos del Instituto del Petróleo, Londres).*

agoten gradualmente las principales fuentes. Sobre esta base se han hecho predicciones de que a principios del próximo siglo habrá escasez de petróleo. Sin embargo, Albert Parker, en su resumen de la información vertida en la Conferencia Mundial de la Energía y Exploración de Recursos Energéticos, 1974, considera demasiado pesimista el suponer que las reservas de petróleo se agotarán en 40 años. Desde luego, será cada vez más rentable buscar y extraer petróleo en situaciones difíciles, un ejemplo de lo cual es la localización

extracción de petróleo de las rocas situadas bajo el fondo del mar del Norte. Ya se están promoviendo otras empresas similares. Gradualmente, irá siendo rentable explotar los esquistos bituminosos, extrayendo el petróleo por destilación. Los EE. UU. de América, por sí solos, tienen una gran reserva de petróleo en sus extensas formaciones de esquistos bituminosos. Los cálculos del petróleo total explotable a partir de los esquistos y arenas bituminosos de todo el mundo indican que hay unos 170 000 millones de toneladas.

Volviendo al carbón, las previsiones para el futuro no son tan deprimentes. Sin embargo, estamos despilfarrando nuestra herencia de energía solar, almacenada en el carbón, varios centenares de miles de veces más rápidamente de lo que tardó en acumularse. Partiendo de los cálculos (sólo aproximados) de 1972 de producción anual en millones de toneladas, la lista de principales países productores es: URSS (580); EE. UU. (544); República Popular de la China (408); Europa occidental (363). La producción total mundial del año 1972 fue aproximadamente de 2866 millones de toneladas. Las reservas estimadas para el mismo año superaban en mucho los 8000 millones de toneladas. Aunque el uso del carbón como combustible ha disminuido en relación con el de petróleo y gas, el consumo mundial total sigue aumentando, porque el propio carbón es una importante fuente de gas y, como el petróleo, de una infinita variedad de subproductos tales como plásticos, tintes y drogas. Además, para conservar petróleo, deberá usarse cada vez más carbón para la producción de electricidad.

Algunas comparaciones energéticas

El sol es una central nuclear gigantesca que irradia energía en forma de luz solar. Cuando quemamos carbón y petróleo estamos consumiendo parte de la radiación solar que la tierra recibió hace muchos millones de años, convertida por la fotosíntesis en energía química y en parte almacenada en los combustibles naturales. De hecho, estamos viviendo, a una tasa de despilfarros alarmante y extravagante, a expensas de un capital heredado no renovable. La actual tasa creciente de consumo de energía por habitante de la población mundial, la cual, a su vez está creciendo explosivamente, es una de las principales causas de angustia y desconcierto para el bienestar futuro de nuestra raza.

Algunas fuentes terrestres de energía, que como la luz del sol se pueden considerar entradas, son enormes comparadas con las necesidades humanas, pero desgraciadamente el nivel al cual pueden utilizarse aprovechando sus beneficios es muy limitado. Ya es posible obtener calor de la energía solar, a un gran costo, para una vivienda normal, pero es dudoso que la energía solar llegue nunca a proporcionar energía adecuada para fines industriales. Ya se ha inventado un tipo de molino de viento que podría suministrar electricidad si se ubicara en localidades como los Downs meridionales. Para facilitar la comparación, es útil expresar las distintas manifestaciones de la energía en las mismas unidades. Una de las medidas de energía más fáciles de comprender es el kilowatio-hora (kWh), que corresponde a la electricidad usada por un fogoncillo eléctrico (de 1 kilowatio) durante una hora.* Es apropiado porque la electricidad se genera a partir de todas las fuentes naturales de energía: combustibles, luz y calor solar, manantiales de vapor, mareas, vientos y fisión nuclear.

En la tabla de la página 329, destaca la supremacía de la radiación solar. Entre todas las demás fuentes, la cuantitativamente más importante, aunque la de menor valor práctico, es el calor recibido en superficie procedente del interior de la tierra. Durante mucho tiempo se creyó que la «gran glaciación» era un síntoma del enfriamiento de la tierra. Ya en 1779, mucho antes de que se supusiera que había habido una gran glaciación, Romé de l'Isle había demostrado que el flujo hacia el exterior del calor interno de la tierra no podía tener efectos climáticos. Esto suele olvidarse tan a menudo que es necesario puntua-

* Las cantidades equivalentes de otras unidades de energía son:
1 KWh = $0{,}86 \times 10^6$ calorías = $3{,}6 \times 10^6$ julios = $3{,}6 \times 10^{13}$ ergios.
1 ergio es la energía necesaria para que 1 gramo se mueva 1 cm por segundo más rápidamente de lo que se movía durante el segundo precedente.
1 julio = 10^7 ergios.
1 caloría (= 4,186 julios) es la energía necesaria para elevar 1°C la temperatura de 1 cm^3 de agua.
1 julio por segundo = 1 watio; 1 kilowatio (kW) = 1000 watios = 1,34 HP.
La combustión de una tonelada de carbón normal promedio produce unos 9000 kWh.

Fuentes de energía	*Unidades de 10^9 kWh por año*
— Radiación solar recibida por la tierra:	
en el límite externo de la atmósfera	1 560 000 000
en superficie, donde en su mayor parte se consume en la evaporación del agua	930 000 000
en tierra	250 000 000
— Flujo de calor procedente del interior de la tierra	230 000
— Actividad volcánica promedio	650
Plantas geotérmicas: Italia	1
Nueva Zelanda	0,7
— Energía del agua de cascadas y lagos elevados (potencial)	20 000
— Mareas (prácticamente, muy poca energía disponible)	10 000
— Vientos (muy poco utilizados hasta el presente)	84 000
— Rayos y relámpagos (un rayo promedio supone unos 3 000 a 5 000 kWh y en cualquier momento dado hay unas 3 000 a 6 000 tronadas)	8 000
— Terremotos	3 000

lizarlo constantemente. La radiación recibida del sol es unas 7000 veces mayor que el flujo de calor procedente del interior de la tierra.

La actividad volcánica está tan localizada que, para el mundo en conjunto, su contribución térmica es sólo una fracción mínima del flujo total de calor interno, aunque esta consideración no facilita la explicación de la actividad volcánica. Sin embargo, desde otros puntos de vista tales como la expulsión de anhídrido carbónico y cenizas, la actividad volcánica puede tener efectos climáticos significativos. Ocasionalmente, se produce una gran erupción, como la del Bezymianny en 1956, que libera tanta energía como el promedio anual de todos los volcanes del mundo. Las explosiones volcánicas son demasiado feroces para que puedan ser reprimidas, pero, como ya se ha visto, actualmente se están estableciendo estaciones geotérmicas en regiones favorables.

Estas instalaciones geotérmicas son muy interesantes porque por pequeña que sea su producción total de energía, es muchísimo mayor que la que se ha obtenido a partir del aprovechamiento directo del calentamiento solar. El hombre no puede competir con la fotosíntesis, que es sin duda el método más eficaz de retener la energía solar. Por el mero hecho de asegurar una importante fuente de energía, la silvicultura tiene un gran futuro.

En importancia para el hombre, las plantas hidroeléctricas ocupan el segundo lugar, después de la combustión de madera y turba, pero a pesar del gran número de ellas, no llegan a cubrir ni siquiera el 2 por ciento de las necesidades actuales. Se ha calculado que si el Mediterráneo se convirtiera en un mar interior cerrándolo por los estrechos de Gibraltar y de los Dardanelos, el nivel podría llegar a bajar unos 107 m por evaporación. Plantas energéticas instaladas en Gibraltar, Gallípolis y en la desembocadura del Nilo podrían producir anualmente unos 1000×10^9 kWh. Este plan imposible de realizar sólo sirve para hacer resaltar las limitaciones de las plantas basadas en la fuerza del agua, excepto para unos pocos países favorecidos como Noruega y Suiza.

En relación con la energía nuclear, debe añadirse que ya se conocen reservas explotables de minerales de uranio, como los de Canadá, EE. UU., URSS, África y Australia, de las que pueden obtenerse cantidades de energía mucho mayores que las que se obtendrían de todas las reservas mundiales de combustibles convencionales. A un precio que sea adecuado, hay suficiente uranio explotable como para que se pueda sostener un consumo de energía unas 15 000 veces mayor que el actual consumo anual. Los frenos inmediatos contra el uso generalizado de la energía nuclear son el elevado coste de instalación y el temor a acci-

dentes serios. Además, aunque el vertido de residuos radiactivos se ha convertido, con razón, en un asunto serio, en general no se constata que la forma en la que nos deshacemos de nuestro principal subproducto, el anhídrido carbónico, ya ha tenido consecuencias climáticas y económicas de importancia mundial. Al quemar nuestros recursos de carbón y petróleo, cada día se vierten a la atmósfera millones de toneladas de anhídrido carbónico.

Efectos climáticos de la combustión

John Tyndall, en 1861, fue el que primero hizo notar que el anhídrido carbónico en el aire debe tener una influencia crítica en la temperatura y el clima por su efecto de «invernadero». El vidrio de un invernadero es transparente a la mayoría de radiaciones del sol. Cuando el sol calienta su interior, las ondas caloricas rerradiadas incluyen longitudes de onda infrarrojas, para las cuales el vidrio es opaco. Por consiguiente, la proporción correspondiente de calor queda atrapada y la temperatura en el invernadero sigue aumentando. Análogamente, la atmósfera es prácticamente transparente a la radiación y calienta la superficie de la tierra. Pero la tierra refleja gran parte de esta energía en forma de infrarrojos, para los cuales el anhídrido carbónico es opaco. Cuanto mayor es la cantidad de anhídrido carbónico contenida en la atmósfera, mayor es la cantidad de radiación que queda retenida sin regresar al espacio. Por consiguiente, si no intervienen otros factores, cuando en la atmósfera inferior aumenta el contenido en anhídrido carbónico, la temperatura también aumenta.

Actualmente, la atmósfera contiene 2300×10^9 toneladas de anhídrido carbónico, lo que supone aproximadamente un 0,03 por ciento de su masa total. Tal como se indica en la figura 16.1, la quema de combustibles y diversas actividades agrícolas añaden a este total 11×10^9 toneladas de anhídrido carbónico cada año. De este modo, en los últimos cien años se han añadido unas $400 \times \times 10^9$ toneladas. En un tiempo tan corto, los océanos sólo pueden haber absorbido una pequeña proporción; esto supone que las actividades humanas han producido un aumento aproximado del 13 por ciento del anhídrido carbónico del aire. Teóricamente, sería de esperar que esto produjera un aumento de temperatura que sería más marcado en las latitudes más altas. En Europa septentrional, el promedio de temperatura del invierno ha subido unos 2° o 3°C, y en Islandia y Groenlandia aún ha subido más. En 1900 sólo se podía embarcar carbón de Spitsbergen tres meses al año, y ahora ya se embarca durante siete meses. El hielo ártico actualmente ya sólo rara vez llega a las costas de Islandia, como ocurría a principios de siglo. Más al sur, los países situados a ambos lados del Atlántico quedan ahora más expuestos que antes a tormentas ciclónicas y en el transcurso del siglo el tiempo ha empeorado y los huracanes e inundaciones son más frecuentes. Y como la faja de tormentas ciclónicas se ha desplazado al norte de estas latitudes, por eso el bacalao ha emigrado de ellas hacia el norte de lo que un día fueron importantes bancos de pesca.

Para cuando se hayan agotado todas las reservas de carbón y petróleo y contando con la absorción oceánica, se calcula que habrá unas diez veces más de anhídrido carbónico en la atmósfera del que hay actualmente. En promedio, las temperaturas serán entonces unos 12°C más altas de lo que habrían sido. Posteriormente, cuando se establezca el equilibrio por la sostenida absorción oceánica del anhídrido carbónico, este aumento disminuirá hasta ser de sólo unos 7°C. Con el aumento de calor conseguido durante este siglo, los glaciares y casquetes de hielo se han estado fundiendo mucho más rápidamente de lo que se han repuesto con las nevadas. Un ascenso de temperatura como el calculado sería más que suficiente para provocar su desaparición total.

Asumiendo que no haya procesos de interferencia efectiva durante los miles de años necesarios para fundir todo el hielo de Groenlandia y Antártida, es posible calcular el efecto en el nivel del mar (véase la pág. 17 para los volúmenes de hielo). Si las aguas fundidas fueran simplemente devueltas a los océanos y no ocurriera nada más, el nivel subiría unos 76 m. Pero, de hecho, el ascenso sería menor porque: *a*) el peso del agua devuelta al océano deprimiría isostáticamente los fondos oceánicos; *b*) el material de profundidad desplazado fluiría bajo los continentes (cf. figura 3.18, pág. 42) y los levantaría; *c*) Groenlandia y Antártida se elevarían isostáticamente como consecuencia de haberse liberado de una inmensa

carga de hielo, y *d*) el flujo hacia los continentes del material de profundidad implicado en esta recuperación isostática procedería principalmente de debajo de los fondos oceánicos circundantes que, por consiguiente, se hundirían. Cada efecto desencadena otros, como una reacción en cadena decreciente; pero como todos ellos se producen conjuntamente y a tasas diferentes, es totalmente imposible predecir cuál será el nivel del mar en un momento dado del futuro. Si los hielos se fundieran a una tasa muy rápida en comparación con la tasa de respuesta isostática, el ascenso inicial del nivel del mar podría ser de un máximo de entre 46 y 60 metros; muy posteriormente, cuando los ajustes isostáticos restablecieran el equilibrio, el nivel descendería gradualmente hasta situarse en 40-37 metros. Londres, Nueva York y todos los demás puertos y ciudades situadas en tierras bajas de todo el mundo quedarían desastrosamente sumergidas. Como compensación parcial, las partes más elevadas de los zócalos rocosos de Groenlandia y Antártida serían tierras con un clima agradable.

Pero la suposición de que no haya procesos que interfieran ya está perdiendo base —por lo menos temporalmente—. Durante las dos o tres últimas décadas, unos cuantos glaciares han dejado de fundirse y han reiniciado el avance. Se sabe que, además del contenido en anhídrido carbónico de la atmósfera, otros factores influyen en los cambios climáticos, aunque todavía es problemático el saber cuáles son sus efectos relativos. Aquí se ha mencionado el efecto del anhídrido carbónico sólo para resaltar las marcadas consecuencias de la quema de combustibles a una tasa de centenares de miles de veces más rápida que la de su acumulación.

Referencias seleccionadas

Averitt, P., 1974, *Coal Resources of the United States*: United States Geological Survey Bulletin, No. 1416.

Cargo, D. N., and Mallory, B. F., 1974, *Man and His Geological Environment*, Addison-Wesley, Reading, Mass.

Jones, J. M., and Cooper, B. S., 1972, 'Coal', Chapter 5 in Johnson, G., and Hickling, G., *Transactions of the Natural History Society of Northumberland, Durham, and North Tyne*, vol. 41, No. 1.

Plass, G. N. 1959, 'Carbon dioxide and climate', *Scientific American*, vol. 201, pp. 41–7.

Levorsen, R. J., 1967, *Geology of Petroleum*, 2nd edn, Freeman, San Francisco.

Stanton, R. L., 1972, *Ore Petrology*, McGraw-Hill, New York.

World Statistics 1975, The Institute of Petroleum Information Service, p. 8.